



LAND
TIROL

Nasse Deposition in Tirol im Jahr 2022

Impressum

Amt der Tiroler Landesregierung

Abteilung Waldschutz

Bürgerstraße 36

6020 Innsbruck

Email: waldschutz@tirol.gv.at

www.tirol.gv.at/umwelt/luftqualitaet

Durchführung und Berichterstellung:

Technische Universität Wien
Institut für Chemische Technologien und Analytik
Arbeitsgruppe für Umweltanalytik
1060 Wien, Getreidemarkt 9/E164-02-2



Wien, 2023

Bericht CTA-EAC-01/23

Inhalt

Kurzfassung..... 1

1. Hintergrund und Ziel der Studie..... 2

2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition..... 4

2.1. Beschreibung des Probenahmegerätes..... 4

2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol..... 5

2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung..... 8

3. Ergebnisse und Diskussion 9

3.1. Mittlere Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr..... 9

3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf 11

3.3. Trends der Konzentrations- und Depositionswerte seit 1983..... 23

3.4. Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern 35

3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen 43

4. Zusammenfassung..... 49

5. Literatur..... 50

Kurzfassung

Zwischen dem 01.01.2022 und dem 31.12.2022 wurden an den drei Tiroler Messstellen in Höfen (Bezirk Reutte), Niederndorferberg (Bezirk Kufstein) und Innervillgraten (Bezirk Lienz) bei Niederschlagsereignissen täglich Proben der nassen Deposition gesammelt. Im Labor wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und der Ionengehalt (NH₄⁺-, Na⁺-, K⁺-, Ca²⁺-, Mg²⁺-, Cl⁻-, NO₃⁻- und SO₄²⁻-Konzentrationen) der Niederschlagswässer bestimmt. Insgesamt wurden 387 Niederschlagsproben gesammelt und ausgewertet (143 aus Höfen, 118 aus Innervillgraten, 126 aus Niederndorferberg).

Erwartungsgemäß variierten die täglichen Niederschlagsmengen und die Konzentrationswerte der ionischen Komponenten in den einzelnen Proben sehr stark. Niederschlagsmengen über 16 mm wurden je nach Station an 8 % bis 15 % aller Niederschlagstage gemessen. Sie bewirkten aber bereits 29 % bis 51 % der gesamten Niederschlagsmenge und auch einen überdurchschnittlich hohen Anteil des Stoffeintrags. Das zeigt, dass einzelne ergiebige Niederschlagsereignisse einen großen Anteil am gesamten Ioneneintrag haben. Der Eintrag durch nasse Deposition erfolgte dementsprechend schubweise.

Die Auswertungen der Messdaten ergaben Einträge über die nasse Deposition von **1,6 kg S/ha/a** sowie **6,2** und **7,0 kg N/ha/a** an den Messstellen in Nordtirol, während in Innervillgraten (Osttirol) Einträge von **0,9 kg S/ha/a** und **5,1 kg N/ha/a** festgestellt wurden. Damit ist für Schwefel keine Überschreitung der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (= 3 kg Schwefeleintrag/ha/a gemäß dem „Critical Load“- Konzept; WHO, 1995) anzunehmen. Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/a werden von der WHO (1995) als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen. Berücksichtigt man, dass der Gesamteintrag nicht nur mit dem Niederschlag erfolgt, sondern auch über die trockene Deposition und den Nebel gegeben ist, so ist hier eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge in die Umwelt von Bedeutung.

An der Messstelle in Höfen wurden 6 Niederschlagsproben (von insgesamt 143) aus der Auswertung genommen. In Niederndorferberg wurden 8 Niederschlagsproben (von insgesamt 126), während in Innervillgraten 18 Niederschlagsproben (von insgesamt 118) aus der Auswertung ausgeschlossen.

Einen Überblick über die im Zeitraum von Jänner bis Dezember 2022 gemessenen Stoffeinträge von Schwefel und Stickstoff durch Nasse Deposition gibt Abbildung 1. Dabei sind alle Stationen berücksichtigt, für die eine Berichtsabfassung durch die TU Wien erfolgt.

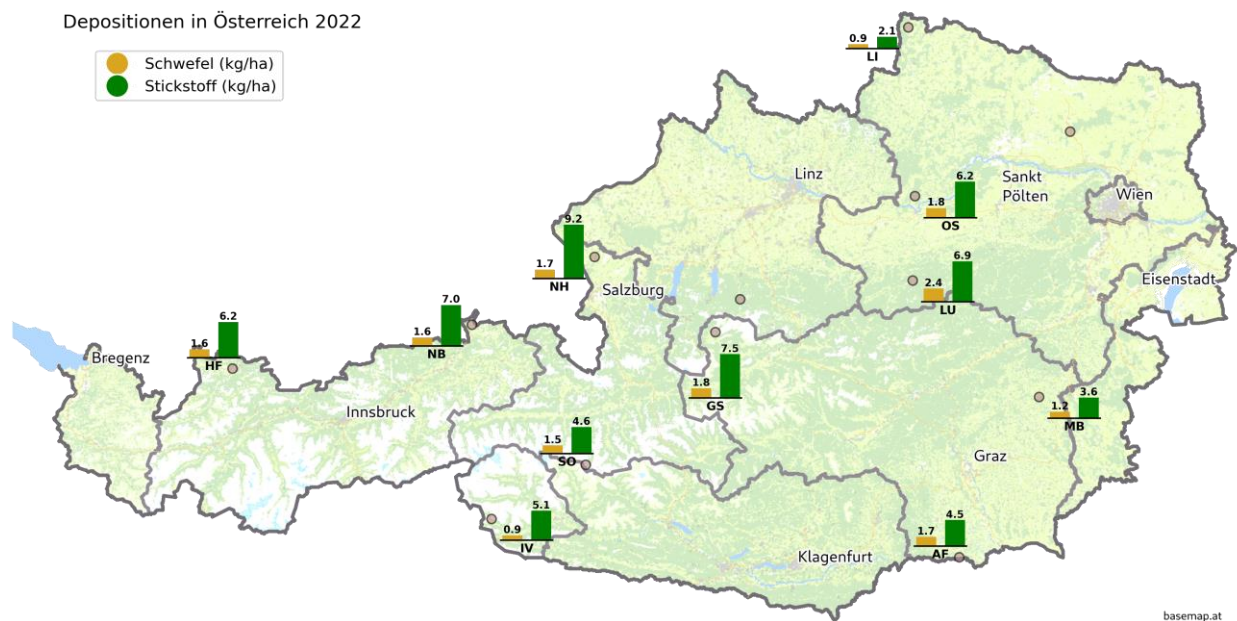


Abbildung 1: Schwefel- und Stickstoffdepositionen im Untersuchungszeitraum 2022.

1. Hintergrund und Ziel der Studie

In den 1970er Jahren traten in Mitteleuropa großflächig neuartige Waldschäden, meist unabhängig von Klima, Standort und waldbaulichen Praktiken, auf. Die Schäden an Bäumen umfassten zum einen eine Auflichtung des Kronenbereichs aufgrund vorzeitigen Blattfalls, kleinere und weniger Blattoorgane wie auch Verzweigungsanomalien. Zum anderen zeigten sich auch Schädigungen am Wurzelsystem durch ein starkes Absterben von Feinwurzeln, geringe Reproduktionsfähigkeiten und verminderte Mykorrhizierung. Als Verursacher für dieses sogenannte „Waldsterben“ wurde die komplexe Wirkung verschiedener Luftschadstoffe erkannt, welche über große Distanzen transportiert werden können und vor allem in Form von nasser Deposition (bekannt als „Saurer Regen“) in die Ökosysteme eingetragen werden. Weitere Phänomene dieses grenzüberschreitenden Eintrags atmosphärischer Spurenstoffe waren die Abnahme des pH-Wertes, die Mobilisierung toxischer Kationen in Böden und aquatischen Systemen, aber auch die Eutrophierung und die strukturelle Verarmung terrestrischer Ökosysteme. Als Konsequenz wurden in Tirol, wie auch in anderen Bundesländern, an mehreren Standorten Messstationen zur Quantifizierung der Schadstoffeinträge über die nasse Deposition errichtet (Tabelle 1). In den späten 1980er- und in den 1990er-Jahren konnte aufgrund von Luftreinhaltegesetzen, den zwingenden Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken und durch die Abschaltung einiger Braunkohlekraftwerke, auch in der ehemaligen DDR und CSSR, eine kontinuierliche Abnahme der Schwefeleinträge beobachtet werden. In Tirol wurde die Anzahl der Messstandorte für die nasse Deposition in den späten 1980er Jahren sukzessive dezimiert, sodass ab dem Jahr 1990 nur mehr jene drei Stationen mit den damals höchsten Schadstoffeinträgen weiter erhalten wurden. Diese drei Stationen werden auch heute noch im Sinne des Langzeitmonitorings und zur aktuellen Überwachung der nassen Deposition betrieben. Zwei Standorte befinden sich am Alpennordrand in Höfen/Bezirk Reutte (bis Oktober 2015 in Wängle/Bezirk Reutte) und Niederndorferberg/Bezirk Kufstein und eine Station südlich des Alpenhauptkamms in Innervillgraten/Bezirk Lienz.

Tabelle 1: Ehemalige und aktuelle(*) Messstandorte in Tirol zur Bestimmung der nassen Deposition.

Ort	Messstellenbezeichnung (interne Kennnummer der Abt. Waldschutz, Land Tirol)	Messungszeitraum
Innsbruck	Seegrube (2123)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Gramartboden (2131)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Reichenau (2135)	Dezember 1985 – März 1988
Nößlach	Kalkschmied (2214)	Dezember 1984 – September 1986
Schmirn	Obern (2219)	Oktober 1985 – September 1986
Niederndorferberg*	Niederndorferberg (2526)	November 1983 – dato
Reutte	Wängle (2701)	November 1983 – 18.10.2015
Höfen*	Schiliftweg 3 (2711)	01.12.2015 – dato
Achenkirch	Ampelsbacherhof (2810)	Oktober 1983 – Juni 1989
Innervillgraten*	Innervillgraten 27 (2903)	August 1984 – dato

Derzeit werden die WADOS-Messstellen in Österreich von den jeweiligen für Umwelt- bzw. Immissionsschutz zuständigen Landesbehörden betrieben. Nähere Angaben zu diesen, sowie den in der Vergangenheit betriebenen Messpunkten befinden sich im Anhang. Abbildung 2 zeigt die Lage der einzelnen Stationen. Die Abkürzungen beziehen sich auf die Stationskennungen, die auch in den Tabellen im Datenanhang angegeben sind (Tabelle A 18 und Tabelle A 19).

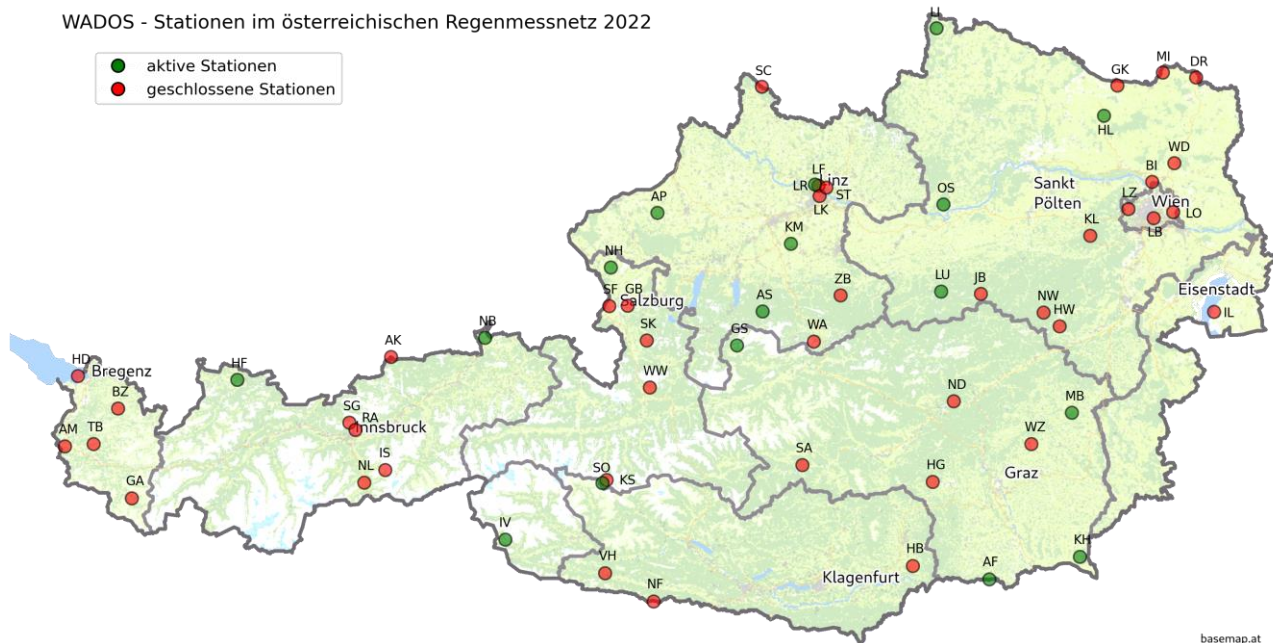


Abbildung 2: Lage der WADOS - Stationen im österreichischen Niederschlagsmessnetz für das Niederschlagsjahr 2022

Die Niederschlagsmessungen dienen der Erfassung der zeitlichen und räumlichen Trends der Stoffeinträge von Schwefel- und Stickstoffverbindungen, freier Säure sowie von neutralisierenden Kationen. Die Bestimmung des Stoffeintrags durch die nasse Deposition ist für die Abschätzung des Zustands und der zukünftigen Entwicklung von Ökosystemen gemäß dem „Critical Load“-Konzept von Bedeutung. Seit den ersten Arbeiten zur Darstellung der Umweltprobleme durch den Stoffeintrag von z.B. Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Granat 1978) liegen nun Zeitreihen von etwa 40 Jahren vor, die für Europa beispielsweise von Torseth et al. (2012) dargestellt werden. Eine globale Bewertung des Stoffeintrags und der Niederschlagschemie im Zeitraum 2000 bis 2007, mit einem Vergleich von Messungen und Modellrechnungen, erfolgte in der Arbeit von Vet et al. (2014). Auch für Österreich werden Zeitreihen zum Stoffeintrag in der Literatur beschrieben (Tsakovski et al. 2000, Greilinger et al. 2016).

Im vorliegenden Bericht werden nun die Messergebnisse der Nassen Deposition in Tirol von Jänner 2022 bis Dezember 2022 zusammengefasst und erläutert. Neben der Darstellung der Jahreseinträge wird die zeitliche Variabilität der Einträge einerseits anhand der Monatsmittel und andererseits über ihr Langzeitverhalten (z.B. Trends seit Beginn der Messungen) mit Schwergewicht auf die Hauptkomponenten (S- und N-Verbindungen) dargestellt. Ein Überblick über die Messergebnisse aus anderen Bundesländern rundet die Darstellungen ab. Abschließend liefert der Zusammenhang zwischen Regenmenge und Stoffkonzentrationen weitere Grundinformationen über die nasse Deposition in Tirol.

2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition

2.1. Beschreibung des Probenahmegerätes

Der WADOS (**W**et **A**nd **D**ry **O**nly **P**recipitation **S**ampler) ist ein Probenahmegerät, das die getrennte Sammlung von nasser und trockener Deposition ermöglicht. Unter „nasser Deposition“ versteht man den Eintrag durch Niederschlagsereignisse in Form von Regen oder Schnee, während unter „trockener Deposition“ der direkte Eintrag von Staub oder gasförmigen Luftinhaltsstoffen verstanden wird. In Österreich wird der WADOS nur zur Probenahme der nassen Deposition verwendet. Abbildung 3 zeigt den WADOS. Auf der linken Seite des Bildes befindet sich der Auffangbehälter für die nasse Deposition, der mit einem Deckel verschlossen ist. Im rechten Bildteil ist im Hintergrund der schwarze Niederschlagssensor zu sehen. Davor befindet sich der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Sobald der Regensensor einen Niederschlag meldet, wird der Auffangbehälter für die nasse Deposition geöffnet und der Deckel über das Sammelgefäß für die trockene Deposition bewegt. Regen oder Schnee werden somit gesammelt, und die Niederschlagsprobe rinnt durch einen Trichter in eine unten angeschraubte Probenflasche. Um zu verhindern, dass eine grobe Verschmutzung in die Probeflasche gelangt, ist ein auswechselbares Sieb eingebaut. Die Probenflasche selbst ist durch das verlängerte Mantelrohr vor Strahlung geschützt. Das Wechseln der Probenflasche geschieht durch einfaches Ab- und Aufschrauben der Reserve-Probeflasche täglich zwischen 7 und 8 Uhr morgens. Der Messstellenbetreuer misst dabei den gesammelten Niederschlag und transferiert eine Teilprobe (ca. 50 ml) in ein wesentlich kleineres Probenfläschchen. Dadurch wird das Sammeln, Aufbewahren (gekühlt und im Dunkeln) und der Transport der Proben für eine spätere chemische Analyse erleichtert.



Abbildung 3: WADOS der Firma Kroneis GmbH (Messtechnik für die Umwelt-Meteorologie A-1190 Wien, Iglaseegasse 30-32). Links befindet sich die Vorrichtung zur Messung der nassen Deposition, rechts der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Der Deckel wird je nach Witterung über die Vorrichtungen geschwenkt.

Der WADOS ist standardmäßig mit einer Heizung inklusive Thermostat ausgerüstet. Der Schnee, der vom Sammelgefäß aufgefangen wird, schmilzt im Inneren und tropft in die untere Probenflasche, wo er wieder gefrieren kann. Die Heizwicklung ist im unteren Drittel an der Außenwand des Auffanggefäßes angebracht. Dies hat zur Folge, dass der Schnee, der im oberen Bereich aufgefangen wird, nicht sofort abgeschmolzen wird. Erst wenn der Deckel wieder geschlossen wird, schmilzt der Schnee ab. Damit können Verdunstungsverluste vermieden werden. Die Temperatur zwischen 8 und 10 °C wird durch ein Thermostat im Sammelgefäß gehalten.

Ist der Niederschlag zu Ende, dann trocknen die Tropfen auf der Regensensoroberfläche durch eine erhöhte Heizstufe (Oberflächentemperatur ca. 50°C) relativ rasch ab. Nach einer Schaltverzögerung von ca. 5 Minuten geht der Deckel wieder auf das Sammelgefäß für nasse Deposition zurück. Die Sensoroberfläche wird jetzt nur mehr auf ca. 20°C gehalten, damit Nebel und Taubildung keine Regenmeldung auslösen. Ein direkter Vergleich zwischen den Regenmengen im WADOS und in einem Ombrometer (Messstelle Höfen, Untersuchungsjahr 2016), der von der Abteilung Waldschutz durchgeführt wurde, ergab eine um ca. 10% verringerte Regenmenge durch das Funktionsprinzip des WADOS-Messgeräts. Eine Datenauswertung ergab zudem, dass Regenmengen unter 0,3 mm/Tag aufgrund des

verspäteten Öffnungsmechanismus und der Benetzungsverluste im WADOS nicht mehr erfasst werden.

Die Probenahme der trockenen Deposition kann durch Austausch des dafür vorgesehenen Sammelgefäßes mit einem Ersatzgefäß erfolgen. In Tirol wird auf die Bestimmung der Einträge über die trockene Deposition mit dem WADOS verzichtet.

2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol

Stationsbezeichnung:

Höfen

Gemeindekennziffer:

70816

Stationsnummer:

2711

Anschrift der Station:

6600 Höfen, Schilliftweg 3

Bezirk:

Reutte

Seehöhe der Station:

874 m

Geographische Länge (WGS84):

10° 40' 50,95" E

Geographische Breite (WGS84):

47° 28' 15,21" N

Topographie, Lage der Station:

Tal- und Beckenlage

Geologie:

Nördliche Kalkalpen. Im Bereich der Messstation liegen rigide Gesteine der Lechtaldecke wie Muschelkalk und Wettersteinkalk auf weichen, tonreichen Gesteinen der Allgäudecke wie Fleckenmergel und Kalkmergel (Röhring, 1997).

Klima:

Das Becken von Reutte gehört nach Walter und Lieth (1960) der Klimazone VI (X)3 mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen an. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt auf 869 m Meereshöhe 1457 mm, und die Jahresmitteltemperatur liegt bei 6,9 °C (Tirol Atlas, 2017). In Höhen um 1500 m steigt die Niederschlagsmenge auf ca. 1600 bis 1800 mm an.

Boden:

Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland (im Winter Schipiste)

Station besteht seit:

01.12.2015 – dato

Anmerkung:

Übersiedelung der Station Wängle/Reutte (Nov/83 bis 18.10.2015) nach Höfen im Herbst 2015.



Abbildung 4: WADOS am Standort Höfen/Bezirk Reutte mit Wetterstation des hydrographischen Dienstes Tirol.

Stationsbezeichnung:
Niederndorferberg

Gemeindekennziffer:
70519

Stationsnummer:
2526

Anschrift der Station:
6342 Niederndorferberg, Eiberg 7b

Bezirk:
Kufstein

Seehöhe der Station:
697 m

Geographische Länge (WGS84):
12° 13' 36,65" E

Geographische Breite (WGS84):
47° 39' 43,60" N

Topographie, Lage der Station:
Hanglage



Abbildung 5: WADOS am Standort Niederndorferberg/ Bezirk Kufstein.

Geologie:
Nördliche Kalkalpen. Die Gemeinde Niederndorferberg erstreckt sich über sanft hügelige Strukturen im Bereich der Bayrischen Voralpen über Höhenlagen zwischen ca. 550 m und knapp über 1000 m Seehöhe. Geologisch gesehen liegt der größte Teil des Gemeindegebietes über Fleckenmergeln und Kalken, daneben spielen auch die Kössener Schichten eine große Rolle. Kleinräumig treten dann noch Aptychenkalke, sowie Terrassensedimente und Gletschermoränen auf (Geologische Bundesanstalt, 2007).

Klima:
Die Gemeinde Niederndorferberg liegt nach Walter und Lieth (1960) in der Klimazone VI(X) mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit (Tirol Atlas, 2017).

Boden:
Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:
Ländliches Wohngebiet, Grünland

Station besteht seit:
November 1983 – dato

Stationsbezeichnung:
Innervillgraten

Gemeidekennziffer:
70710

Stationsnummer:
2903

Anschrift der Station:
9932 Innervillgraten Nr. 27

Bezirk:
Lienz

Seehöhe der Station:
1729 m

Geographische Länge (WGS84):
12° 21' 06,14" E

Geographische Breite (WGS84):
46° 49' 04,74" N

Topographie, Lage der Station:
Hanglage

Geologie:

Der größte Teil der Gemeinde liegt auf dem Altkristallin (Alte Gneise). Das Altkristallin wird in seinem Südabschnitt durch die Dominanz von Paragneisen, z.T. auch Marmore, v.a. bei Kalkstein, Glimmerschiefer, Amphibolite und Eklogite charakterisiert. Unmittelbar am Villgratenbach befinden sich vor allem Schwemm- bzw. Murenkegel und undifferenzierte Moränen (Geologische Bundesanstalt, 2006).

Klima:

Das Villgratental gehört, wie alle anderen größeren Täler und Seitentäler in Osttirol (mit Ausnahme des Tiroler Gailtales) zur temperierten Zwischenalpenzone (VI4). Die Winter sind zwar ausgeprägt, dauern jedoch nicht sehr lange. Die Jahresniederschläge liegen um ca. 1.100 mm, wobei im Sommer mittlere und im Winter mäßige Niederschlagsmengen zu erwarten sind (Walter und Lieth, 1960). Für Innervillgraten auf 1400 m Meereshöhe wurde für die Periode 1980-2000 ein mittlerer Jahresniederschlag von ca. 1000 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 3,6 °C gemessen (Tirol Atlas, 2017). Die meisten Niederschläge wurden für diese Periode im Juni und Juli verzeichnet, die geringsten im Jänner und Februar.

Boden:

Ranker, Braunerden

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland

Station besteht seit:

August 1984 – dato



Abbildung 6: WADOS am Standort Innervillgraten/Bezirk Lienz.

2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung

Im Analysenlabor des Landes Tirol (Sachgebiet Chemische Technische Umweltschutzanstalt) werden der pH-Wert (Maß für die Azidität), die elektrische Leitfähigkeit und die anorganischen Ionen Chlorid, Nitrat und Sulfat sowie Natrium, Ammonium, Kalium, Calcium und Magnesium bestimmt. Angaben zu den Analysemethoden und Verfahrenskennwerten befinden sich im Datenanhang (Tab. A 20 und A 21).

Bei der Analyse werden die Konzentrationswerte der Tagesproben bestimmt. Zur Bestimmung der mittleren Konzentrationswerte über z.B. einen Monat dürfen diese Werte nicht einfach gemittelt werden, da Tage mit großer Niederschlagsmenge stärker zur Bildung einer Mischprobe beitragen als Tage mit geringem Niederschlag. Es ist eine Gewichtung der Tagesproben über die Niederschlagsmenge vorzunehmen. Diese Mittelwertbildung ist in Formel 1 beschrieben.

Formel 1: Berechnung der gewichteten mittleren Konzentration

$$C = \frac{\sum_i c_i V_i}{\sum_i V_i} = \frac{c_1 * V_1 + c_2 * V_2 + c_3 * V_3 + \dots + c_n * V_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

C...gewichtete mittlere Konzentration [mg/L]
c ...Konzentration [mg/L]
V...Niederschlagsmenge [mm]

Die Stoffeinträge (Depositionswerte) werden gemäß Formel 2 aus den Konzentrationswerten und der Niederschlagsmenge berechnet. Hohe Einträge können sowohl durch hohe Konzentrationswerte als auch durch große Niederschlagsmengen verursacht werden.

Formel 2: Berechnung der Deposition

$$D = \frac{c * V}{100}$$

D...Deposition [kg/ha]
c ...Konzentration [mg/L]
V...Volumen [mm]

Die untersuchten Kationen und Anionen werden im weiteren Bericht wie in Tabelle 2 abgekürzt.

Tabelle 2: Abkürzungen der untersuchten Kationen und Anionen

Kationen		Anionen	
NH ₄ ⁺	Ammonium	Cl ⁻	Chlorid
NH ₄ ⁺ - N	Ammonium – Stickstoff ¹	NO ₃ ⁻	Nitrat
Na ⁺	Natrium	NO ₃ ⁻ - N	Nitrat – Stickstoff ²
K ⁺	Kalium	SO ₄ ²⁻	Sulfat
Ca ²⁺	Calcium	SO ₄ ²⁻ - S	Sulfat – Schwefel ³
Mg ²⁺	Magnesium		

Die Azidität des Niederschlagswassers wird als pH-Wert und als H⁺-Konzentration dargestellt. Der Eintrag an freier Säure wird als H⁺-Eintrag angegeben. Die Analysendaten der einzelnen Tagesproben sind im Datenanhang dieses Berichts aufgelistet.

¹ Ammonium-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Ammoniumions vorliegt.

² Nitrat-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Nitrations vorliegt.

³ Sulfat-Schwefel bezeichnet die Menge/Konzentration an Schwefel (S), die in Form des Sulfations vorliegt.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Mittlere Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr

Die mittleren Konzentrationswerte sowie die Jahreseinträge sind in den Tabellen 3 und 4 angeführt. Im Datenanhang sind, ergänzend zu den Jahresmittelwerten, die Ergebnisse für die einzelnen Quartale sowie die Sommer- und Winterhalbjahre dargestellt (Tab. A 22 – A 25). Zusätzlich werden im Anhang alle Ergebnisse auch als Äquivalentkonzentrationen gelistet (Tab. A 26 und A 27).

Tabelle 3: Mengengewichtete Jahresmittelwerte der Konzentrationswerte im Niederschlag im Jahr 2022

NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]	[µg/L]						[mg/L]					
Höfen													
1220	6,1	0,80	0,09	0,41	0,32	0,06	0,73	0,10	0,15	0,84	0,19	0,39	0,13
Niederndorferberg													
1136	5,7	1,87	0,11	0,51	0,40	0,08	0,46	0,04	0,18	0,99	0,22	0,42	0,14
Innervillgraten													
670	6,0	1,02	0,07	0,80	0,62	0,09	0,33	0,04	0,11	0,77	0,17	0,43	0,14

Tabelle 4: Jahreseinträge der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) im im Jahr 2022

NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]	[g/ha]						[kg/ha]					
Höfen													
1220	6,1	9,7	1,12	4,97	3,87	0,73	8,91	1,25	1,83	10,28	2,32	4,73	1,58
Niederndorferberg													
1136	5,7	21,3	1,26	5,81	4,52	0,95	5,17	0,49	2,10	11,27	2,55	4,76	1,59
Innervillgraten													
670	6,0	6,8	0,48	5,38	4,18	0,60	2,23	0,29	0,76	5,15	1,16	2,89	0,96

Für die Bestimmung des Gesamtsäureeintrags durch die nasse Deposition ist zunächst der pH-Wert interessant. Im Jahresmittel 2022 wurden in Tirol pH-Werte zwischen 5,7 und 6,1 gemessen. Da der pH-Wert auch von natürlich vorkommenden Luftinhaltsstoffen bestimmt wird, spricht man erst bei pH-Werten unter 5,0 vom „Sauren Regen“. Eine Belastung durch „Sauren Regen“ ist nach dieser Definition im Jahresmittel nicht zu erkennen.

Sulfat und Nitrat stellen die Anionen der starken Säuren Schwefelsäure und Salpetersäure dar. Schwefelsäure bildet sich in der Atmosphäre aus Schwefeldioxid, während Salpetersäure aus den Stickstoffoxiden (NO_x, i.e. Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid) gebildet wird. Schwefeldioxid entsteht vor allem bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen (z.B. Kohle) und bei industriellen Prozessen. Die Umwandlung von Schwefeldioxid zu Schwefelsäure dauert mehrere Stunden bis wenige Tage. In dieser Zeit können Luftschadstoffe durch Windströmungen mehrere 100 km transportiert werden und so große Gebiete beeinflussen. Dies gilt sowohl für den Ausgangsstoff Schwefeldioxid, als auch für das gebildete Sulfat. In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Emissionen von Schwefeldioxid in Österreich und in den Nachbarländern deutlich reduziert. Im Vergleich zu den ersten Messungen in den 1980er Jahren sind die Konzentrationswerte für Sulfat an den drei Messstandorten in Tirol derzeit gering und relativ ähnlich. Stickstoffoxide entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen.

Die Hauptquellen sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle. Die Stickoxide treiben zusammen mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen die sommerliche Ozonbildung voran. Durch die Umwandlung zu Salpetersäure beziehungsweise zu partikulärem Nitrat fördern Stickstoffoxide die Feinstaubbildung. Die Feinstaubbildung ist eng mit der Neutralisation der starken Säuren Schwefelsäure und Salpetersäure durch Ammoniak verbunden. Dabei entstehen Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat, die einen wesentlichen Teil des Feinstaubes bilden. Der wichtigste Emittent von Ammoniak ist die Landwirtschaft. Aus diesem Grund können gerade in ländlichen Gebieten deutliche lokale Unterschiede in den Konzentrationswerten für Ammonium auftreten. Nach dem Eintrag wird Ammonium abgebaut, was zur Säurebildung in Gewässern und Böden führt. Abgesehen vom Säureeintrag können die Einträge von Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff zu einer Überdüngung des Bodens und der Gewässer führen (Eutrophierung) und müssen auch deshalb überwacht werden. Die relative Bedeutung der Eutrophierung im Vergleich zum Säureeintrag hat seit Beginn der Messungen in Tirol vor etwas mehr als 30 Jahren deutlich zugenommen.

Die basischen Kationen (Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium) reduzieren den Säureeintrag, da sie vorhandene Säuren neutralisieren.

Für die Konzentrationswerte von Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium und Chlorid sind unterschiedliche Emissionsquellen verantwortlich. Eine Beeinflussung durch Mineralstaub, der lokal (Bautätigkeit, Landwirtschaft, Einsatz von Streusplitt und Wiederaufwirbelung von auf Straßen abgelagertem Material durch den Verkehr) oder auch über Ferntransport (z.B. von Wüstenstaub, der in Österreich oft aus der Sahara stammt) eingebracht werden kann, führt zu räumlichen und zeitlichen Unterschieden der Konzentrationswerte. Alleine auf Basis der vorhandenen Analyseergebnisse ist es schwierig, zwischen einer lokalen Kontamination und einem Ferntransport, der einen für den Messpunkt repräsentativen Eintrag darstellt, zu unterscheiden. Um einen möglichen Ferntransport zu erkennen, wird daher auf Modellrechnungen der GeoSphere Austria zurückgegriffen. Im Jahr 2022 kam es im März zu einem sehr ausgeprägten Ferntransport von Wüstenstaub, was an allen Stationen zu erkennen war. An der Station Höfen wird der Effekt erst am 1. April sichtbar, beim ersten Niederschlagsereignis nach den Tagen mit der stärksten Intensität des Transportevents. In Innervillgraten wurde der Transport nicht vollständig erfasst, da eine Probe aus dem März aus der Auswertung entfernt werden musste, da eine lokale Kontamination durch Düngung wahrscheinlich ist.

Weiters gab es in Höfen in den vergangenen Jahren den Hinweis auf eine lokale Kontamination einzelner Proben durch den Winterdienst. Dies konnte aus den stark erhöhten Werten von Natrium, Chlorid, Calcium und Magnesium abgeleitet werden. Im Jahr 2022 war so ein Einfluss viel weniger deutlich sichtbar. Es wurden lediglich vier Proben im Februar 2022 und zwei Proben im Dezember 2022 aufgrund einer vermuteten Kontamination von den weiteren Auswertungen ausgeschlossen.

Unabhängig von einem Einfluss durch Mineralstaub können auch Verbrennungsprozesse zu einer Erhöhung der Kalium- oder Chloridkonzentrationen führen, wobei speziell feste Brennstoffe zu erwähnen sind.

Ein Vergleich der über das Jahr gemittelten Konzentrationswerte zeigt, dass die Sulfatkonzentration an allen drei Messstationen sehr ähnlich ist. Auch für Nitrat bestehen nur geringe Unterschiede, wobei der höchste Konzentrationswert in Niederndorferberg bestimmt wurde. Für Ammonium wurde der höchste Konzentrationswert in Innervillgraten gemessen. Für die Konzentrationswerte von Calcium und Magnesium ergeben sich noch stärkere Unterschiede zwischen den Stationen. In Höfen wurden im Jahresmittel die höchsten und in Innervillgraten die geringsten Konzentrationswerte gemessen.

Die jährliche Niederschlagsmenge ist an der inneralpinen Messstelle Innervillgraten geringer als an den Messstellen in Höfen und Niederndorferberg am nördlichen Alpenhauptkamm. Da sich der Stoffeintrag aus dem Produkt von Niederschlagsmenge und Konzentration berechnet (Formel 2), ergeben sich andere Verteilungsmuster bei den Eintragsmengen als bei den Konzentrationswerten (vgl. Tabellen 3 und 4). So wurden in Innervillgraten die höchsten Konzentrationswerte für Ammonium bestimmt, der Ammoniumeintrag liegt aufgrund der

geringeren Niederschlagsmenge allerdings unter dem Wert von Niederndorferberg. Diese Unterschiede zwischen den Konzentrations- und Depositionswerten gelten natürlich auch für die anderen Komponenten.

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der jährlichen Depositionsmengen der untersuchten Ionen. $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und Calcium zeigten im Untersuchungsjahr die höchsten Stoffeinträge (kg/ha), wobei der verhältnismäßig hohe Eintrag an Calcium in Höfen besonders deutlich wird. Dieser Effekt, sowie der Einfluss des starken Ferntransportereignisses vom März 2022 wurde weiter oben bereits diskutiert. Lässt man den Einfluss des Transports von Wüstenstaub im März unberücksichtigt, so reduziert sich der Eintrag von Calcium in Höfen um knapp ein Viertel (von 8,9 auf 6,8 kg/ha).

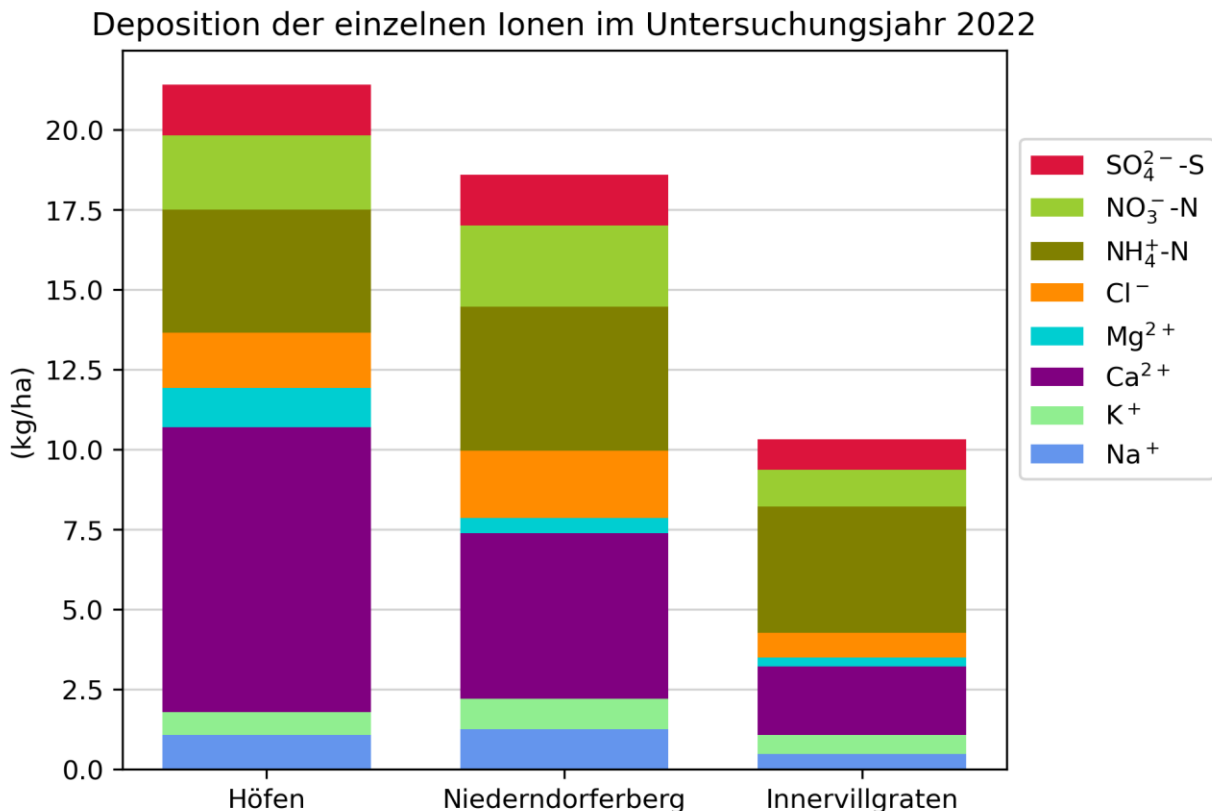


Abbildung 7: Deposition der einzelnen Komponenten an den Tiroler Messstellen im Jahr 2022.

3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf

Bereits Horváth und Mészáros (1984) sowie Rodhe und Granat (1984) untersuchten die jahreszeitlichen Abhängigkeiten der Sulfat- und Nitratkonzentrationen im Niederschlagswasser an verschiedenen Standorten in Europa. Übereinstimmend stellten sie die geringsten Ionenkonzentrationen während der Wintermonate fest und beschrieben ein Konzentrationsmaximum im Frühjahr (März bis April). Auch die Messungen in Österreich zeigen diese saisonabhängigen Veränderungen, die neben Sulfat und Nitrat auch für Ammonium beobachtet werden können. Jahreszeitlich unterschiedlich starke Emissionen der Vorläufersubstanzen (Schwefeldioxid, Ammoniak), Unterschiede bei luftchemischen Prozessen (Oxidation von Schwefeldioxid und den Stickstoffoxiden) und Änderungen in den meteorologischen Ausbreitungsbedingungen bewirken diese saisonabhängigen Veränderungen der Ionenkonzentrationswerte im Niederschlagswasser (Hedin et al. 1991, Kasper und Puxbaum 1994, Hand et al. 2012).

Für Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium und Chlorid sind keine so stetigen saisonalen Änderungen der Konzentrationswerte zu erkennen. Hier werden die Konzentrationsverläufe viel stärker durch Episoden (z.B. lokaler Einfluss oder Ferntransport von Mineralstaub) geprägt.

Die saisonalen Verläufe der Depositionswerte sind durch die Konzentrationswerte und die monatlichen Niederschlagsmengen geprägt. Entsprechend zeigen sie ein anderes Bild als die Verläufe der Konzentrationswerte. Im Sommer treten zumeist die höchsten Niederschlagsmengen auf. Beispielhaft kann dieser Effekt im Beobachtungszeitraum 2022 für die Station Innervillgraten gezeigt werden. Die entsprechenden Niederschlagsmengen waren 122 mm im Winterhalbjahr und 548 mm im Sommerhalbjahr. In Kombination mit den saisonalen Konzentrationswerten waren die Depositionswerte von Nitrat-Stickstoff und Sulfat-Schwefel im Sommer neunmal bzw. achtmal höher als im Winterhalbjahr. Die Ammonium-Stickstoff Deposition war im Sommer sogar sechzehnmal höher als im Winterhalbjahr. Dieser große Unterschied der Depositionswerte zwischen den zwei Halbjahren kann auf die Monaten Jänner, Februar und März zurückgeführt werden. In diesen drei Monaten gab es in Innervillgraten insgesamt nur vier Regenereignisse. In Höfen und Niederndorferberg ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt.

Die Tabellen 5 bis 7 listen die Monatsmittelwerte der Konzentrationswerte und die Tabellen 8 bis 10 die dazugehörigen monatlichen Depositionsmengen auf, die an den drei Messstellen in Tirol bestimmt wurden.

Tabelle 5: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen in **Höfen**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[µg/L]				[mg/L]				
Jän.22	46,6	6,5	0,34	0,11	0,14	0,04	0,46	0,09	0,24	0,17	0,05
Feb.22	112,7	6,4	0,40	0,24	0,22	0,05	0,35	0,11	0,48	0,22	0,10
Mär.22	0,6	-	-	-	0,22	-	-	-	-	-	-
Apr.22	69,2	6,6	0,24	0,14	0,36	0,14	4,19	0,23	0,22	0,38	0,26
Mai.22	114,7	6,2	0,63	0,08	0,66	0,21	0,71	0,12	0,11	0,31	0,26
Jun.22	230,4	6,0	1,02	0,06	0,35	0,05	0,71	0,07	0,08	0,19	0,15
Jul.22	118,9	6,2	0,61	0,04	0,38	0,03	0,33	0,05	0,07	0,16	0,11
Aug.22	124,1	6,1	0,84	0,03	0,47	0,03	0,34	0,07	0,05	0,22	0,13
Sep.22	144,5	5,8	1,71	0,07	0,24	0,03	0,34	0,10	0,13	0,16	0,08
Okt.22	127,7	6,1	0,85	0,04	0,12	0,03	0,47	0,12	0,08	0,08	0,06
Nov.22	55,5	6,4	0,36	0,31	0,22	0,03	0,62	0,20	0,29	0,14	0,12
Dez.22	74,8	6,4	0,43	0,09	0,07	0,03	0,95	0,09	0,15	0,09	0,08

Tabelle 6: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen in **Niederndorferberg**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[µg/L]				[mg/L]				
Jän.22	72,3	5,1	7,55	0,16	0,19	0,04	0,05	0,02	0,29	0,30	0,08
Feb.22	51,1	4,9	12,56	0,47	0,20	0,07	0,11	0,06	0,79	0,25	0,10
Mär.22	14,3	6,8	0,17	0,52	0,45	0,28	12,46	0,37	0,80	0,59	0,86
Apr.22	59,9	6,5	0,35	0,10	0,61	0,14	0,88	0,07	0,14	0,35	0,15
Mai.22	116,5	5,7	2,06	0,05	0,49	0,11	0,44	0,05	0,09	0,24	0,19
Jun.22	183,7	6,3	0,54	0,08	0,43	0,08	0,40	0,04	0,12	0,20	0,15
Jul.22	124,5	6,1	0,83	0,10	0,73	0,11	0,39	0,04	0,13	0,32	0,22
Aug.22	146,1	6,4	0,38	0,03	0,47	0,03	0,12	0,01	0,06	0,21	0,12
Sep.22	116,7	5,7	2,24	0,13	0,38	0,08	0,32	0,03	0,23	0,20	0,12
Okt.22	105,8	6,7	0,19	0,05	0,12	0,08	0,26	0,05	0,15	0,09	0,09
Nov.22	96,3	6,2	0,58	0,17	0,21	0,04	0,14	0,05	0,27	0,13	0,05
Dez.22	48,5	5,8	1,67	0,07	0,24	0,18	0,16	0,04	0,07	0,19	0,06

Tabelle 7: Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen in **Innervillgraten**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[µg/L]				[mg/L]				
Jän.22	5,8	7,6	0,03	0,26	0,44	0,06	0,19	0,02	0,43	0,02	0,02
Feb.22	14,0	4,9	11,42	0,06	0,16	0,04	0,08	0,02	0,05	0,09	0,03
Mär.22	6,3	6,8	0,14	0,09	0,75	0,81	1,12	0,16	0,19	0,13	0,17
Apr.22	46,1	6,1	0,81	0,08	0,63	0,08	0,39	0,07	0,10	0,28	0,18
Mai.22	62,0	6,3	0,51	0,08	0,99	0,13	0,46	0,06	0,12	0,25	0,21
Jun.22	176,2	6,0	0,92	0,06	0,80	0,08	0,41	0,05	0,10	0,16	0,15
Jul.22	98,4	6,3	0,55	0,05	0,64	0,12	0,27	0,04	0,14	0,19	0,21
Aug.22	91,7	6,4	0,43	0,07	1,08	0,30	0,49	0,07	0,13	0,20	0,16
Sep.22	73,7	5,9	1,39	0,06	0,35	0,04	0,09	0,02	0,12	0,15	0,08
Okt.22	37,5	6,4	0,38	0,12	0,16	0,04	0,47	0,04	0,18	0,13	0,18
Nov.22	25,8	5,8	1,46	0,03	0,20	0,04	0,09	0,01	0,05	0,06	0,03
Dez.22	32,4	5,9	1,30	0,19	0,15	0,04	0,06	0,01	0,05	0,09	0,05

Tabelle 8: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe in **Höfen**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[g/ha]	[kg/ha]							
Jän.22	46,6	6,5	0,16	0,05	0,07	0,02	0,21	0,04	0,11	0,08	0,02
Feb.22	112,7	6,4	0,45	0,28	0,25	0,06	0,39	0,12	0,55	0,25	0,11
Mär.22	0,6				0,00						
Apr.22	69,2	6,6	0,17	0,10	0,25	0,10	2,90	0,16	0,15	0,26	0,18
Mai.22	114,7	6,2	0,73	0,09	0,76	0,24	0,82	0,14	0,13	0,35	0,30
Jun.22	230,4	6,0	2,35	0,13	0,82	0,12	1,63	0,17	0,18	0,45	0,35
Jul.22	118,9	6,2	0,73	0,04	0,46	0,03	0,39	0,06	0,09	0,19	0,13
Aug.22	124,1	6,1	1,04	0,04	0,58	0,04	0,42	0,09	0,07	0,27	0,16
Sep.22	144,5	5,8	2,48	0,10	0,35	0,04	0,50	0,14	0,19	0,23	0,12
Okt.22	127,7	6,1	1,08	0,05	0,16	0,04	0,61	0,15	0,10	0,10	0,07
Nov.22	55,5	6,4	0,20	0,17	0,12	0,02	0,34	0,11	0,16	0,08	0,07
Dez.22	74,8	6,4	0,32	0,07	0,06	0,02	0,71	0,07	0,11	0,07	0,06

Tabelle 9: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe in **Niederndorferberg**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[g/ha]	[kg/ha]							
Jän.22	72,3	5,1	5,46	0,12	0,14	0,03	0,04	0,01	0,21	0,22	0,06
Feb.22	51,1	4,9	6,41	0,24	0,10	0,04	0,06	0,03	0,41	0,13	0,05
Mär.22	14,3	6,8	0,02	0,07	0,06	0,04	1,78	0,05	0,12	0,08	0,12
Apr.22	59,9	6,5	0,21	0,06	0,36	0,09	0,52	0,04	0,08	0,21	0,09
Mai.22	116,5	5,7	2,40	0,06	0,58	0,13	0,51	0,05	0,11	0,28	0,23
Jun.22	183,7	6,3	1,00	0,15	0,79	0,14	0,74	0,06	0,21	0,37	0,27
Jul.22	124,5	6,1	1,04	0,12	0,91	0,14	0,48	0,05	0,17	0,40	0,27
Aug.22	146,1	6,4	0,56	0,04	0,69	0,04	0,17	0,02	0,08	0,30	0,18
Sep.22	116,7	5,7	2,61	0,15	0,44	0,09	0,37	0,04	0,27	0,24	0,14
Okt.22	105,8	6,7	0,20	0,05	0,13	0,09	0,28	0,05	0,16	0,10	0,09
Nov.22	96,3	6,2	0,56	0,16	0,20	0,04	0,13	0,05	0,26	0,13	0,04
Dez.22	48,5	5,8	0,81	0,03	0,11	0,09	0,08	0,02	0,03	0,09	0,03

Tabelle 10: Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe in **Innervillgraten**

Monat	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[g/ha]	[kg/ha]							
Jän.22	5,8	7,6	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
Feb.22	14,0	4,9	1,60	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
Mär.22	6,3	6,8	0,01	0,01	0,05	0,05	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01
Apr.22	46,1	6,1	0,37	0,04	0,29	0,04	0,18	0,03	0,05	0,13	0,08
Mai.22	62,0	6,3	0,32	0,05	0,61	0,08	0,28	0,04	0,07	0,15	0,13
Jun.22	176,2	6,0	1,62	0,10	1,40	0,15	0,72	0,09	0,17	0,28	0,26
Jul.22	98,4	6,3	0,54	0,05	0,63	0,11	0,26	0,04	0,14	0,19	0,20
Aug.22	91,7	6,4	0,40	0,07	0,99	0,27	0,45	0,07	0,12	0,18	0,15
Sep.22	73,7	5,9	1,02	0,04	0,26	0,03	0,06	0,01	0,09	0,11	0,06
Okt.22	37,5	6,4	0,14	0,04	0,06	0,02	0,18	0,02	0,07	0,05	0,07
Nov.22	25,8	5,8	0,38	0,01	0,05	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01
Dez.22	32,4	5,9	0,42	0,06	0,05	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,01

In den Abbildungen 8 bis 13 werden die Ergebnisse (Monatsmittelwerte) für Ammonium-N, Nitrat-N und Sulfat-S, geordnet nach den drei Messstellen in Tirol, graphisch dargestellt. Diese Auswahl wurde getroffen, da die genannten Komponenten nicht nur für den Säureeintrag, sondern auch die Eutrophierung von Ökosystemen wesentlich sind. Die Abbildungen 8, 10 und 12 zeigen die Jahregänge, die über alle bisherigen Messperioden (violette Linie) gemittelt wurden, die aktuellen Konzentrationswerte (schwarze Linie) und den Bereich der bisher bestimmten Monatswerte. Der Bereich wurde auf Basis der Perzentilwerte definiert, wobei der untere Rand des grau dargestellten Bereichs dem P3 und der obere Rand dem P97 entspricht. Diese Flächen drücken somit die Schwankungsbreite der bisher erfassten Monatsmittelwerte aus. Die Abbildungen 9, 11 und 13 stellen die Ergebnisse der Depositionswerte analog dar. Die Abbildungen der weiteren Komponenten sind im Anhang dargestellt.

Zur Berechnung der mittleren Jahregänge wurden jeweils die Konzentrationswerte oder Ioneneinträge eines jeden Monats (also alle Jännerwerte, alle Februarwerte, usw. mit Vernachlässigung von Werten außerhalb des genannten Perzentilbereiches) seit Beginn der Messungen volumengewichtet gemittelt. Der direkte Vergleich zwischen aktuellem und langjährigem Mittel ermöglicht ein unmittelbares Erkennen von Besonderheiten der diesjährigen Untersuchungsperiode.

Für die Station Höfen ist die Linie zum aktuellen Jahregang für die Komponenten Nitrat-N und Sulfat-S im März 2022 unterbrochen, während für Ammonium-N ein Monatsmittelwert angegeben wird. Dies ergibt sich daraus, dass es im März 2022 nur an einem Tag geregnet hat und die Niederschlagsmenge so gering war, dass nur die Analyse von Ammonium möglich war.

Zusätzlich zu den saisonabhängigen Unterschieden des Ioneneintrags, die über die Monatsmittelwerte und den daraus abgeleiteten Jahregängen ausgedrückt werden, treten starke tägliche Unterschiede auf. Der Ioneneintrag durch die nasse Deposition ist ungleichmäßig verteilt (Smith und Hunt, 1978). Durch Phasen ohne Niederschlag unterbrochen, werden die Ionen „schubweise“ deponiert. Diese Aussage kann durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden: an der Station Innervillgraten fielen am niederschlagsstärksten Tag (06.06.2022) 30,3 mm Niederschlag, während im Vergleich dazu im Jänner 2022 nur insgesamt 5,8 mm zu verzeichnen waren. Auch in den Monaten Februar, März und November lag die monatliche Niederschlagsmenge unter den genannten 30,3 mm. Eine detailliertere Betrachtung der Tagesproben und des Zusammenhangs zwischen der Niederschlagsmenge und der Stoffkonzentration erfolgt im Abschnitt 3.5.

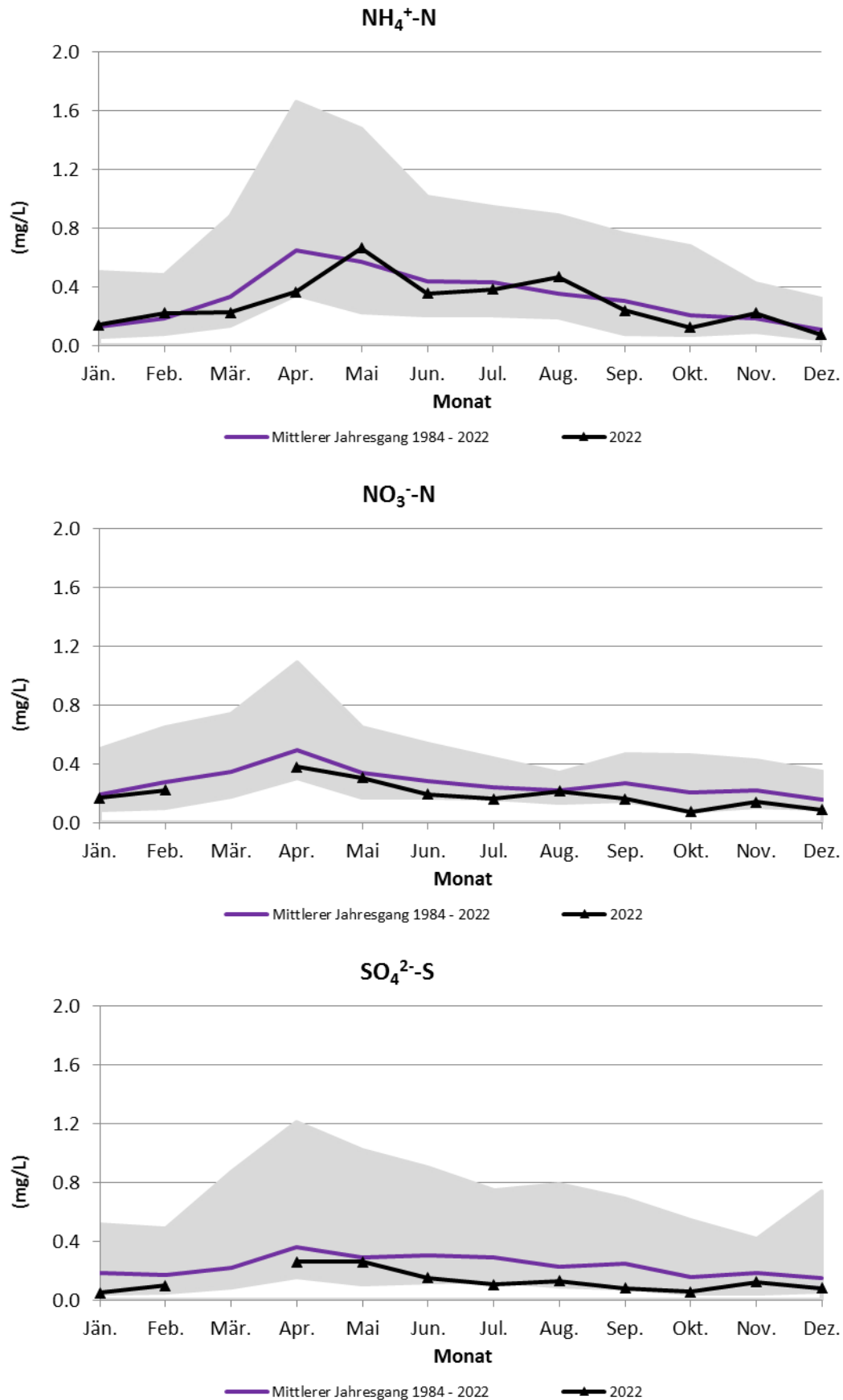


Abbildung. 8: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Höfen**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar. Weitere Angaben im Text.

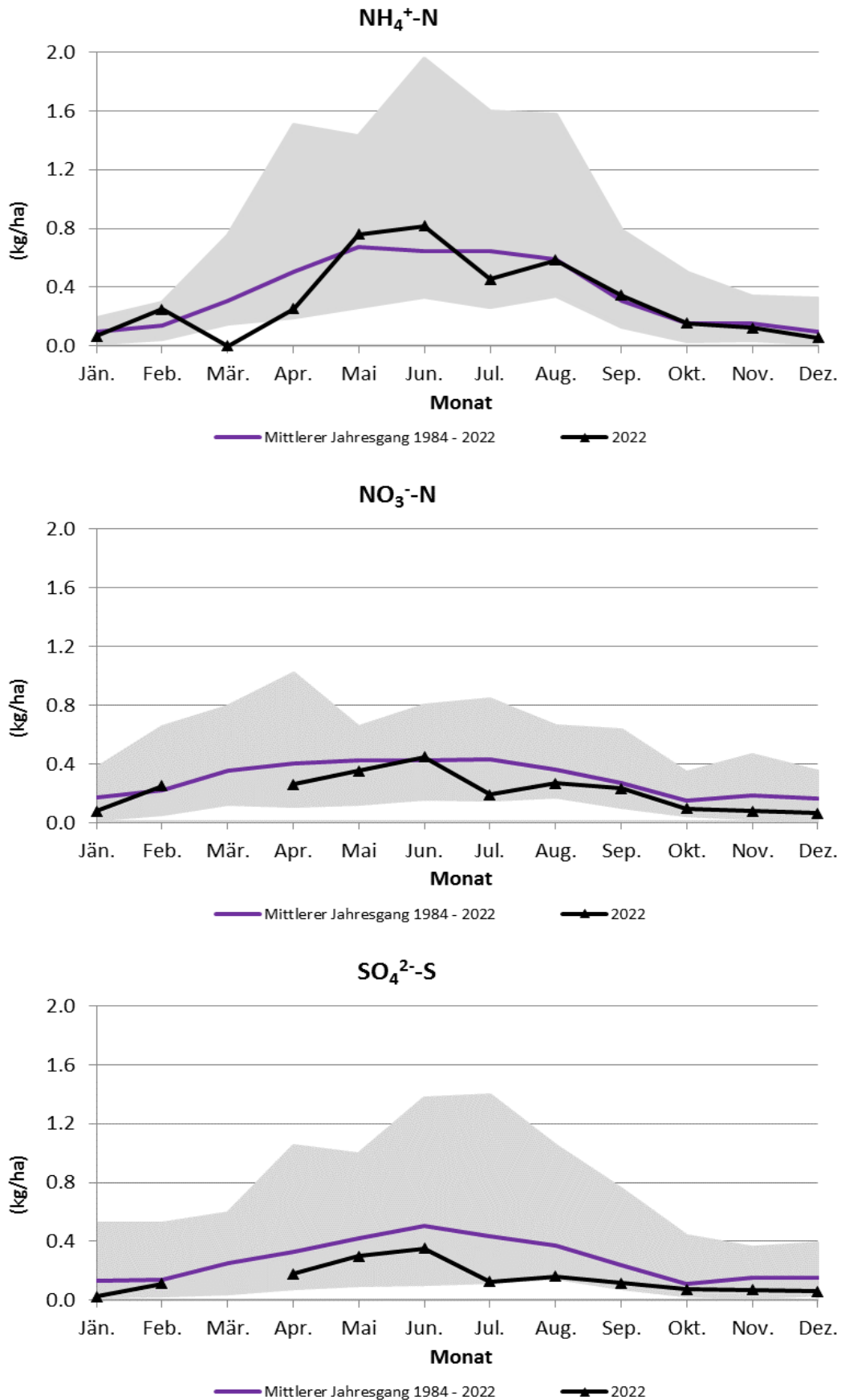


Abbildung 9: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Höfen**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar. Weitere Angaben im Text.

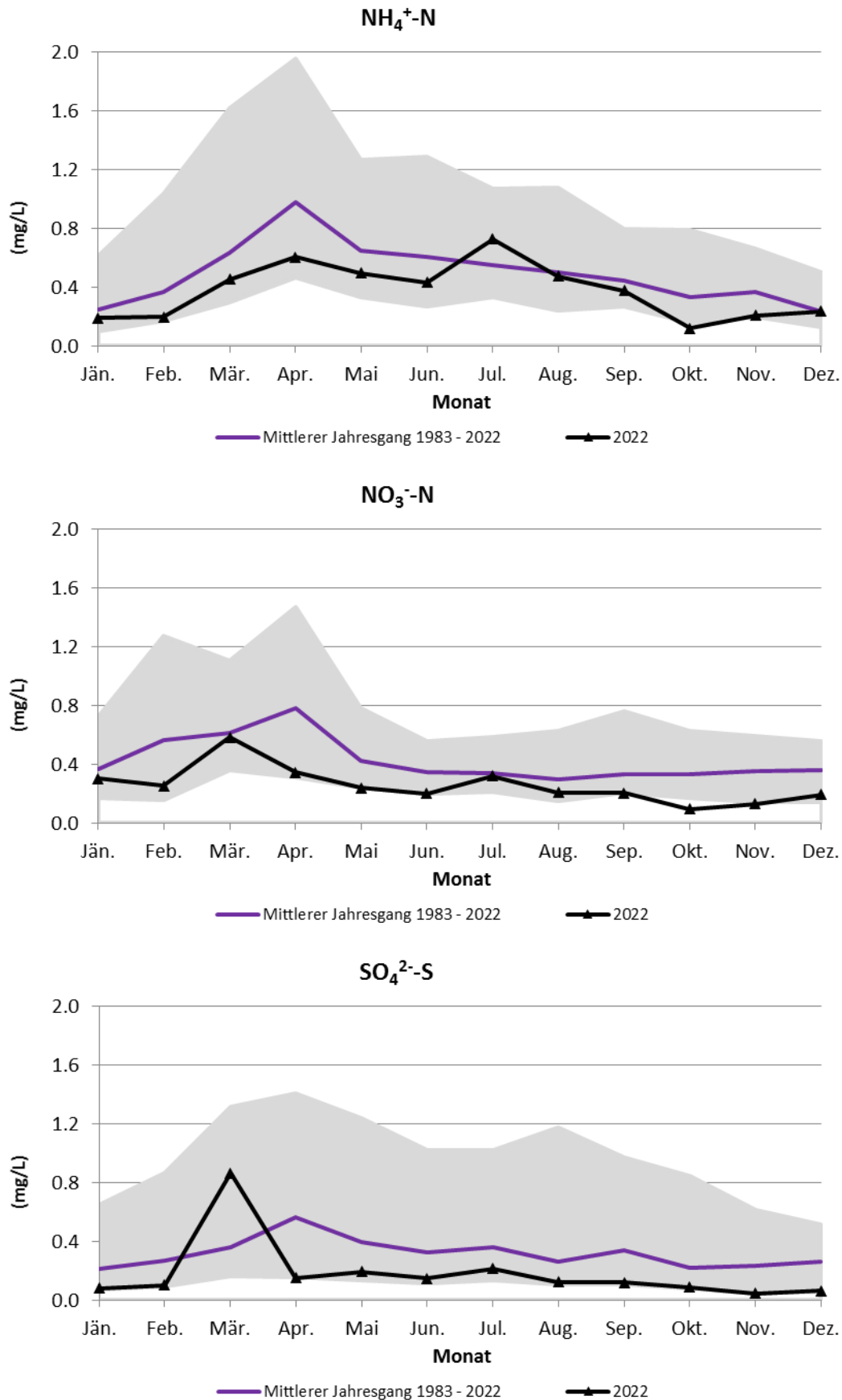


Abbildung. 10: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar.

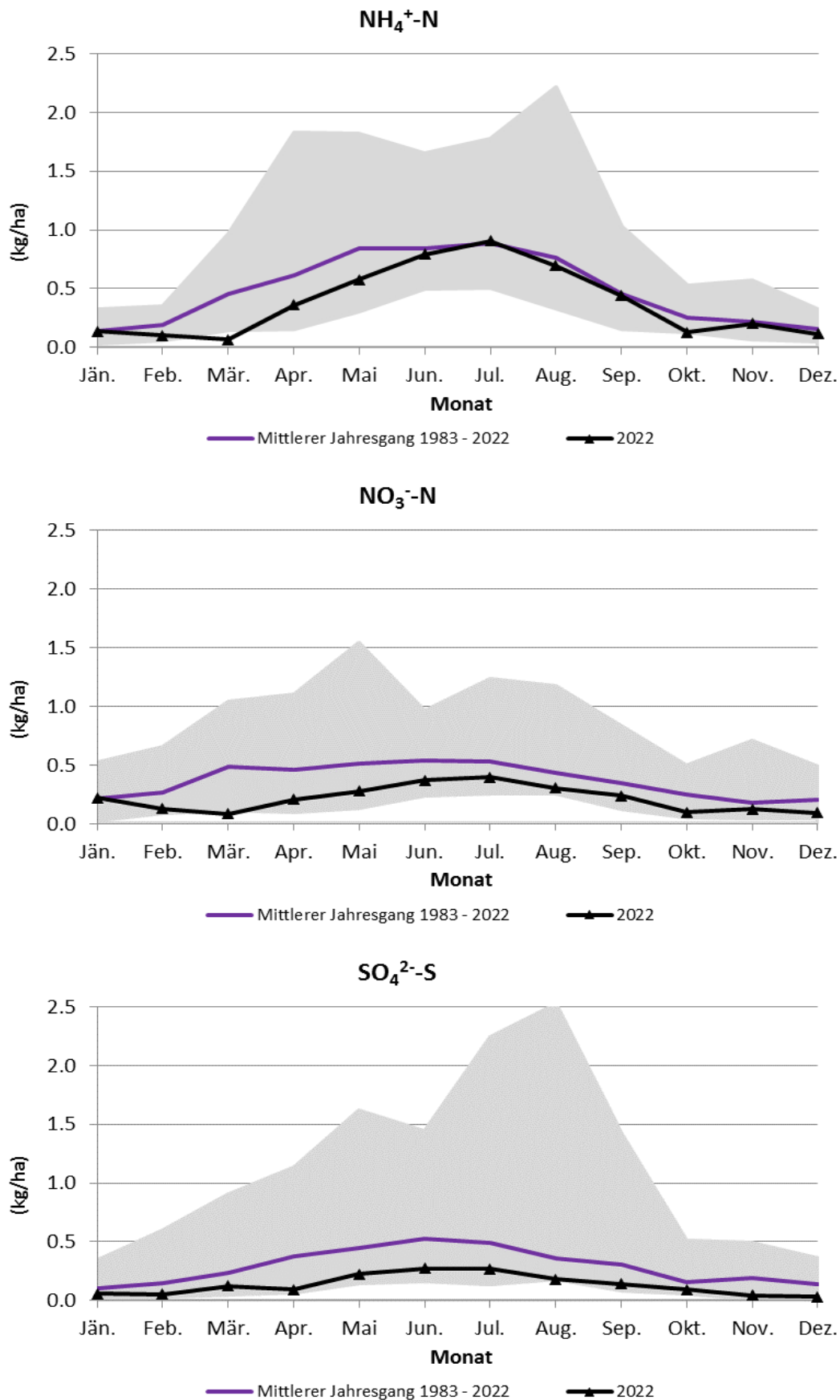


Abbildung 11: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar.

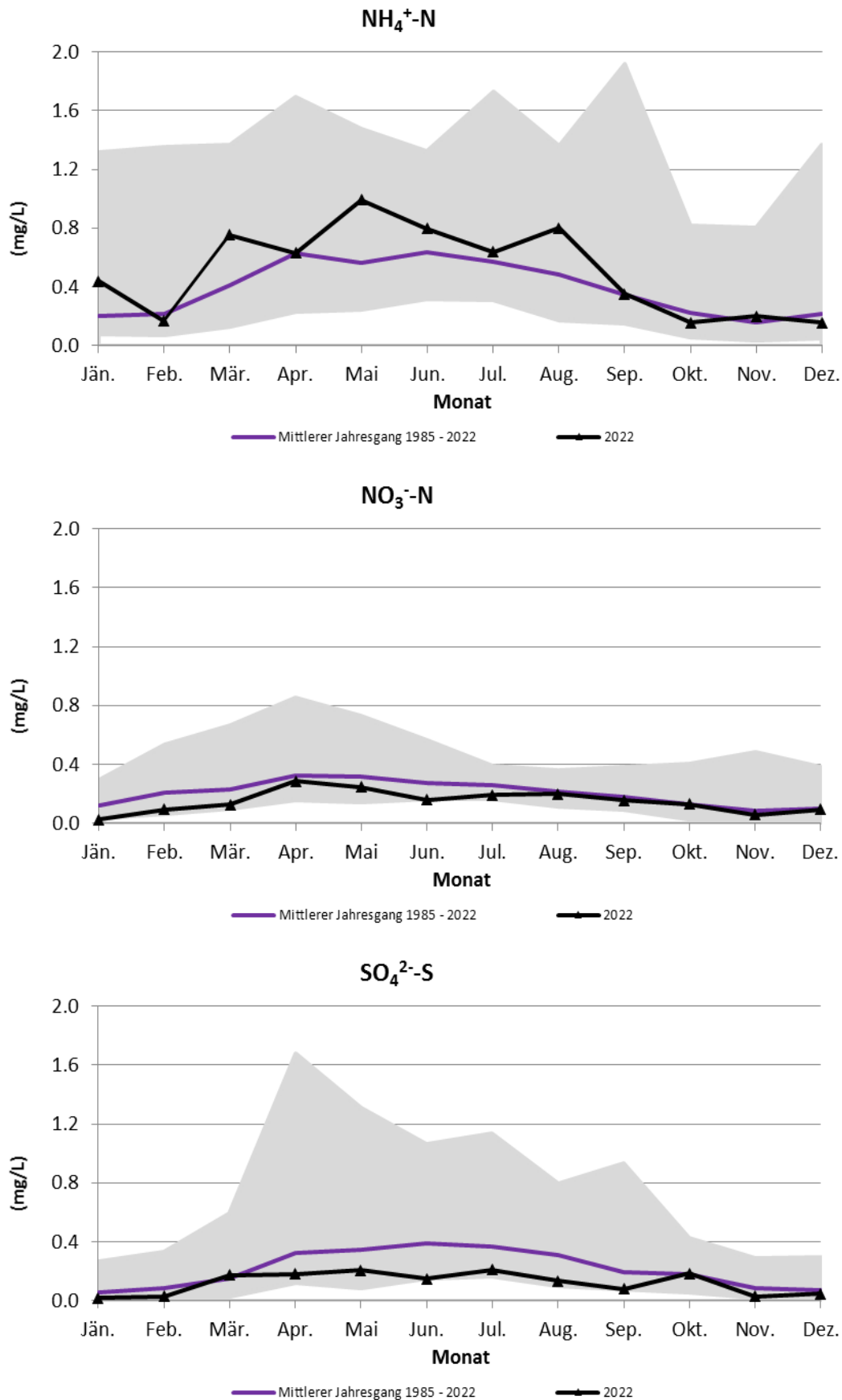


Abbildung. 12: Darstellung der mittleren monatlichen **Konzentrationen** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar.

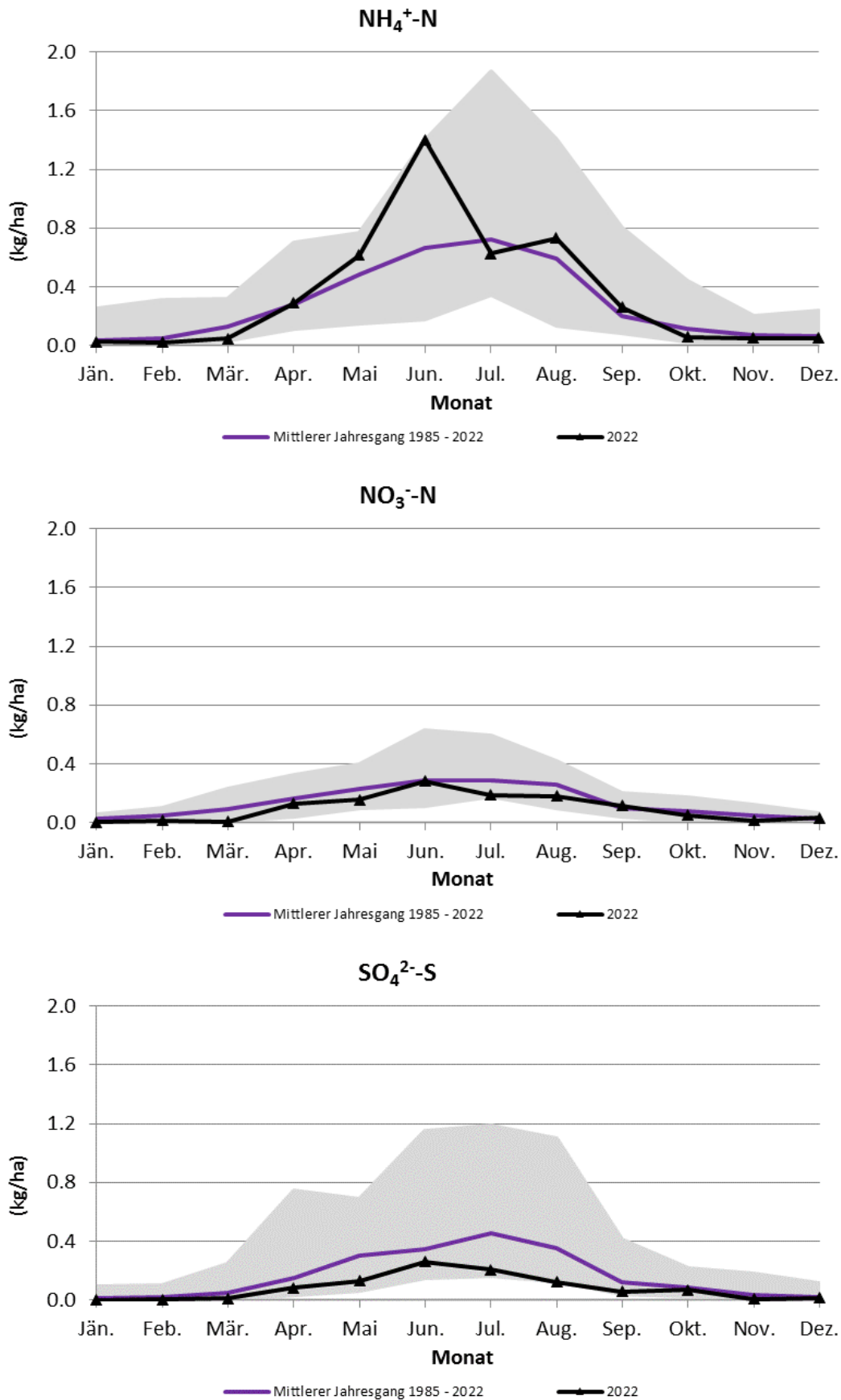


Abbildung 13: Darstellung der mittleren monatlichen **Einträge** in der Untersuchungsperiode 2022 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt die Schwankungsbreite der bisher bestimmten Monatswerte dar.

Wie schon in den Vorjahren, sind auch im aktuellen Beobachtungszeitraum 2022 die Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat zumeist geringer als die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelten Jahregänge. Dies entspricht den Erwartungen, da seit Beginn der Messungen ein deutlicher Rückgang der Emissionen von Schwefeldioxid und partikulärem Sulfat verzeichnet wurde. Dieser Trend wird in den Kapiteln 3.1 und 3.3 näher beschrieben. Umso auffälliger ist das Monatsmittel der Sulfatkonzentration im Monat März in Niederndorferberg. Der Wert liegt über dem langjährigen Mittel für Sulfat und ist auch für einige andere Ionen erhöht. Im März wurden an der Messstation Niederndorferberg nur zwei Regenereignisse erfasst, wobei eine der Tagesproben besonders hohe Konzentrationswerte aufweist, die sicher vom Transportereignis von Wüstenstaub beeinflusst sind. Aufgrund der geringen Niederschlagsmenge ist der Monatsmittelwert der Deposition nicht mehr auffällig.

Auch für Nitrat liegen die aktuellen Monatsmittel unter den gemittelten Jahregängen, wobei die saisonalen Verläufe den Erwartungen entsprechen.

Für Ammonium folgen die jahreszeitlichen Verläufe der Konzentrations- und Depositionswerte weitgehend dem langjährigen Mittel, wobei die aktuellen Jahregänge erwartungsgemäß von Monat zu Monat stärkere Schwankungen zeigen. Speziell in den Frühlings- und Sommermonaten kommt es durch lokale Effekte (z.B. landwirtschaftliche Aktivität, die speziell die Ammoniumwerte beeinflusst), aber auch meteorologische Gegebenheiten (z.B. die Niederschlagsmenge) zu einer höheren Variabilität der Monatsmittel der Konzentration. Dies ist wie in den Vorjahren besonders gut in Innervillgraten zu beobachten und kommt sowohl im aktuellen Jahregang, aber auch in der grau hinterlegte Fläche, die einen Eindruck der Gesamtheit der Daten gibt, zum Ausdruck. Die erhöhten Konzentrationswerte in den Monaten März und Mai sind durch die wenige Regenereignisse und den niedrigen Niederschlagsmengen bedingt. Diese Monate sind bei Betrachtung der Depositionswerte wieder unauffällig. Hingegen sind in den Monaten Juni und August sowohl die Konzentrationswerte als auch die Depositionswerte auffällig hoch.

3.3. Trends der Konzentrations- und Depositionswerte seit 1983

Zur Ermittlung zeitlicher Trends werden die jährlichen Niederschlagsmengen (Abb. 14), die Jahresmittel des pH-Werts (Abb. 15) und der Ionenkonzentrationen sowie die Jahreseinträge der Schwefel- und Stickstoffkomponenten im zeitlichen Verlauf (Abb. 16 bis 27) dargestellt. Über „Kendalls Tau“ wird statistisch geprüft, ob eine signifikante Veränderung der Konzentrations- oder der Depositionswerte vorliegt (Signifikanzniveau $p=0,05$). Für die Parameter, die eine signifikante Veränderung zeigen, wird die absolute Änderung der Konzentrations- oder Depositionswerte über den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Dies erfolgt über die Theil Sen's Regression. Auf signifikante Änderungen wird im Text verwiesen.

3.3.1. Entwicklung der Niederschlagsmengen

In Höfen und Niederndorferberg wurden stets höhere Niederschlagsmengen verzeichnet als am inneralpinen Standort in Innervillgraten (Abb. 14). So liegen in Niederndorferberg und Höfen die Niederschlagsmengen nur selten unter 1100 mm. In Innervillgraten hingegen wurde bisher nur während zwei Saisonen eine Niederschlagsmenge von mehr als 1000 mm verzeichnet. Unabhängig von diesem Unterschied zwischen der inneralpiner Station und den Stationen in Nordtirol zeigen allen drei Stationen von Jahr zu Jahr eine deutliche Variabilität in den Niederschlagsmengen. In der aktuellen Untersuchungsperiode lagen die Niederschlagsmengen in Höfen und Niederndorferberg bei 1220 mm und 1136 mm und damit unter den jeweiligen mittleren Niederschlagsmengen, die in Abbildung 14 durch farbige Linien gekennzeichnet sind. Innervillgraten lag mit lediglich 670 mm deutlich unter den Nordtiroler Stationen.

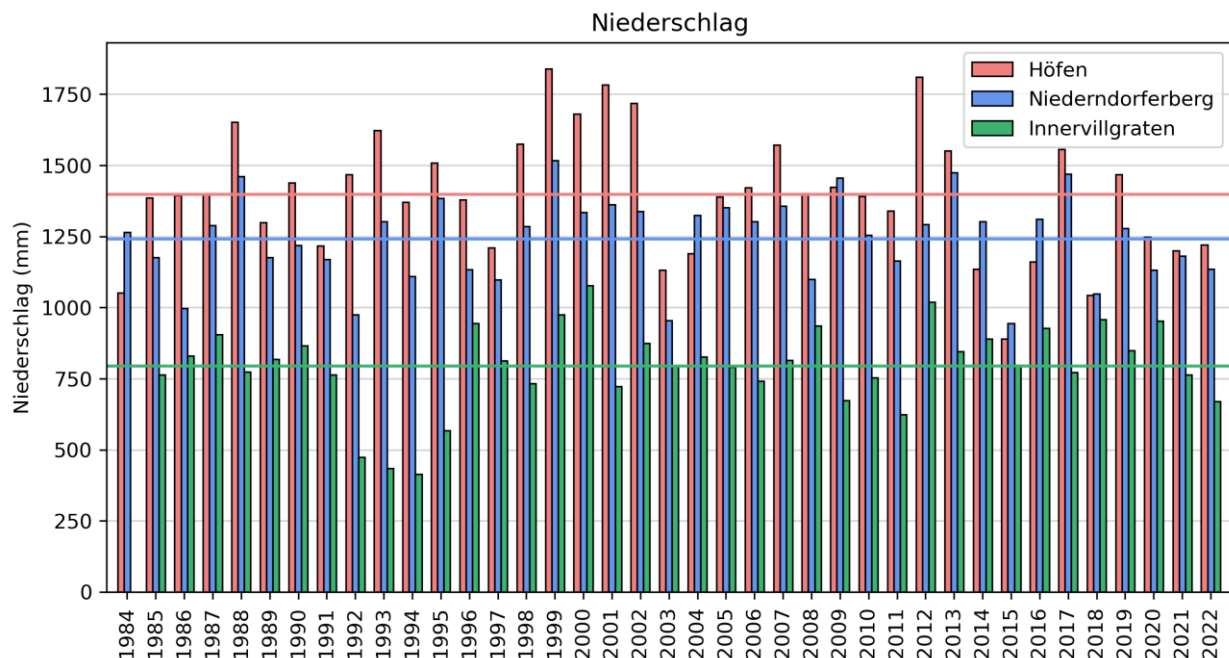


Abbildung 14: Darstellung der jährlichen Niederschlagsmengen seit Beginn der Messungen. Die Linien zeigen die durchschnittlichen Regenmengen erfasst durch das WADOS-Messgerät an den jeweiligen Messstellen seit Beginn der Messungen.

3.3.2. Entwicklung der pH-Werte der Regenwässer an den Messstellen

Seit den 1980er-Jahren ist eine signifikante Zunahme des pH-Wertes zu erkennen. Wurden im Jahr 1985 mittlere pH-Werte von 4,4 bis 4,7 bestimmt, so waren es nun im Jahr 2022 mittlere pH-Werte von 5,7- 6,1 (Abb. 15). Diese Werte liegen im Bereich der natürlichen Azidität des Niederschlags. Dies bringt die abnehmende Schadstoffbelastung der Luft, speziell mit Sulfat, zum Ausdruck (siehe folgender Abschnitt). Die pH-Werte an den Messstellen Höfen und Niederndorferberg sind mit den vorigen Jahren vergleichbar. An der Messstelle Innervillgraten liegt der pH-Wert höher als im Vorjahres und ist wieder gut mit den Ergebnissen der Jahre vor 2021 vergleichbar.

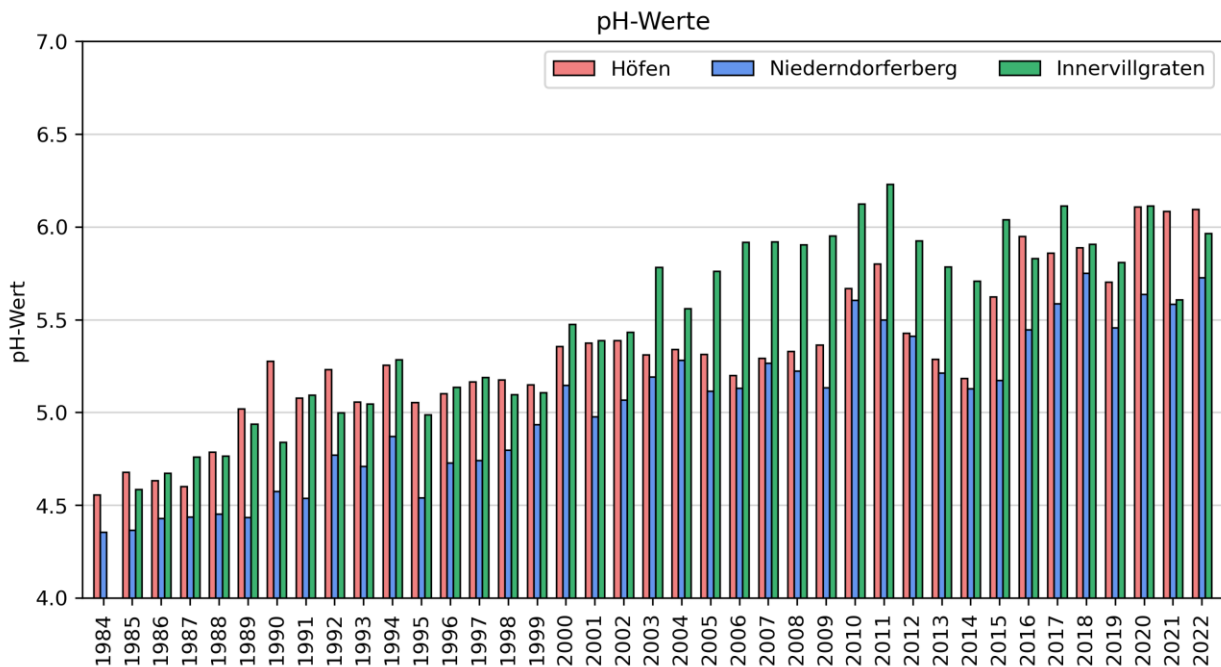


Abbildung 15: Jahresmittelwerte der pH-Werte seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

3.3.3. Entwicklung der Sulfatkonzentrationen und Sulfatdepositionen

Der zeitliche Verlauf zeigt an allen Messstellen fallende Konzentrationswerte für Sulfat, auch wenn in einzelnen Jahren eine vorübergehende Zunahme zu erkennen war (Abb.16). Auch die Depositionswerte für Sulfat-Schwefel sind seit den Messungen der 80er-Jahre an allen Stationen deutlich zurückgegangen (Abb. 17). Ab der Untersuchungsperiode 2015 wurden durch die nasse Deposition keine Überschreitungen der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (entspricht mehr als 3 kg Schwefeleintrag pro Hektar und Jahr gemäß „Critical load“-Konzept, WHO 1995) festgestellt.

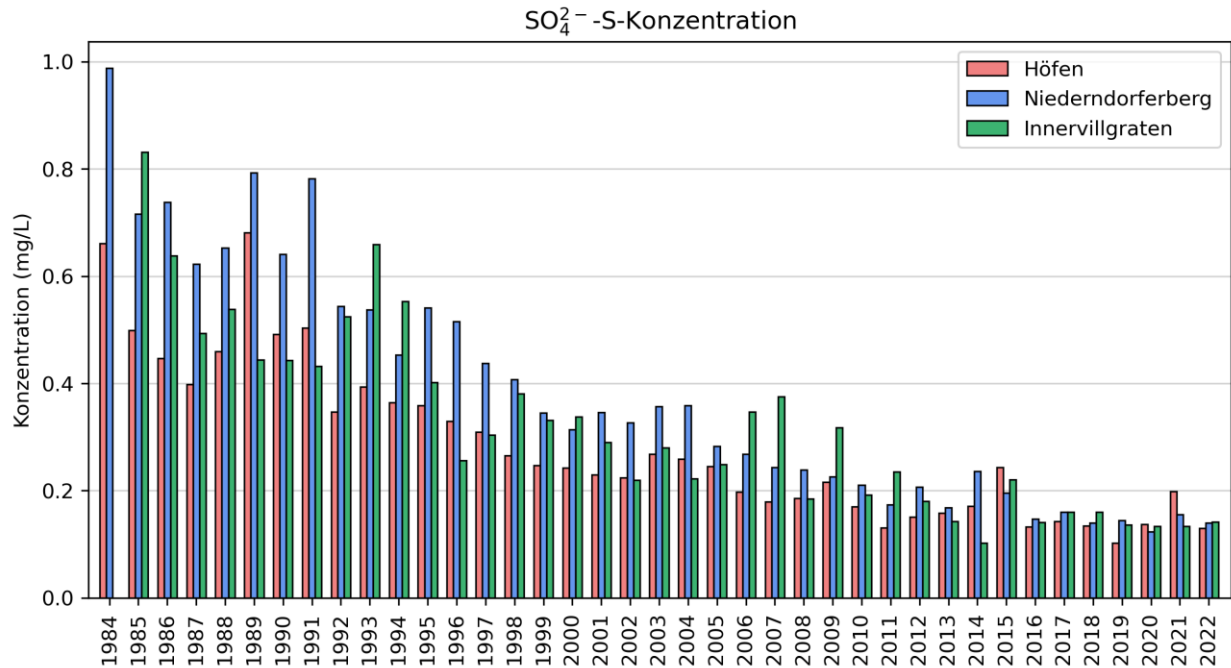


Abbildung 16: Jahresmittelwerte der Konzentration an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen.

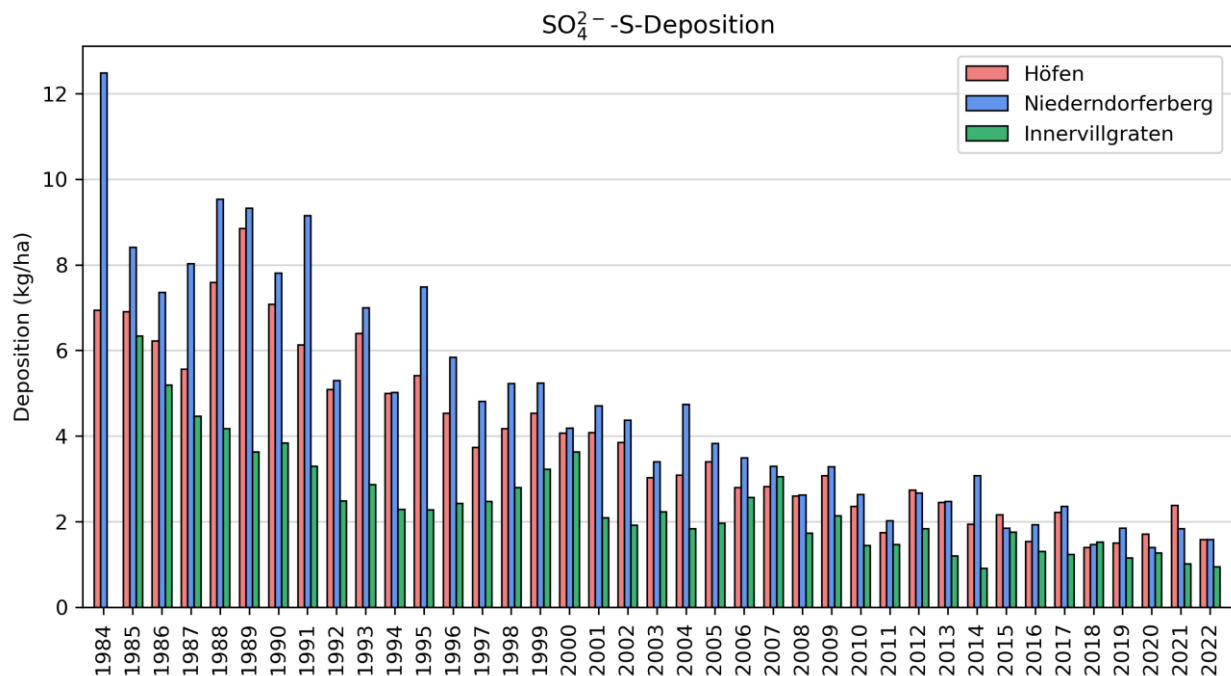


Abbildung 17: Einträge an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

Die Abnahmen der Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat-S sind an allen Messstellen signifikant ($p < 0,05$; Abb. 18). Über den gesamten Untersuchungszeitraum liegt die Abnahme der Konzentrationswerte für Sulfat-Schwefel zwischen 0,4 mg SO_4^{2-} -S/L (Höfen) und 0,7 mg SO_4^{2-} -S/L (Niederndorferberg), was zu einer Verringerung der jährlichen deponierten Mengen um 3,2 kg SO_4^{2-} -S/ha (Innervillgraten) bis 7,7 kg SO_4^{2-} -S/ha (Niederndorferberg) führte.

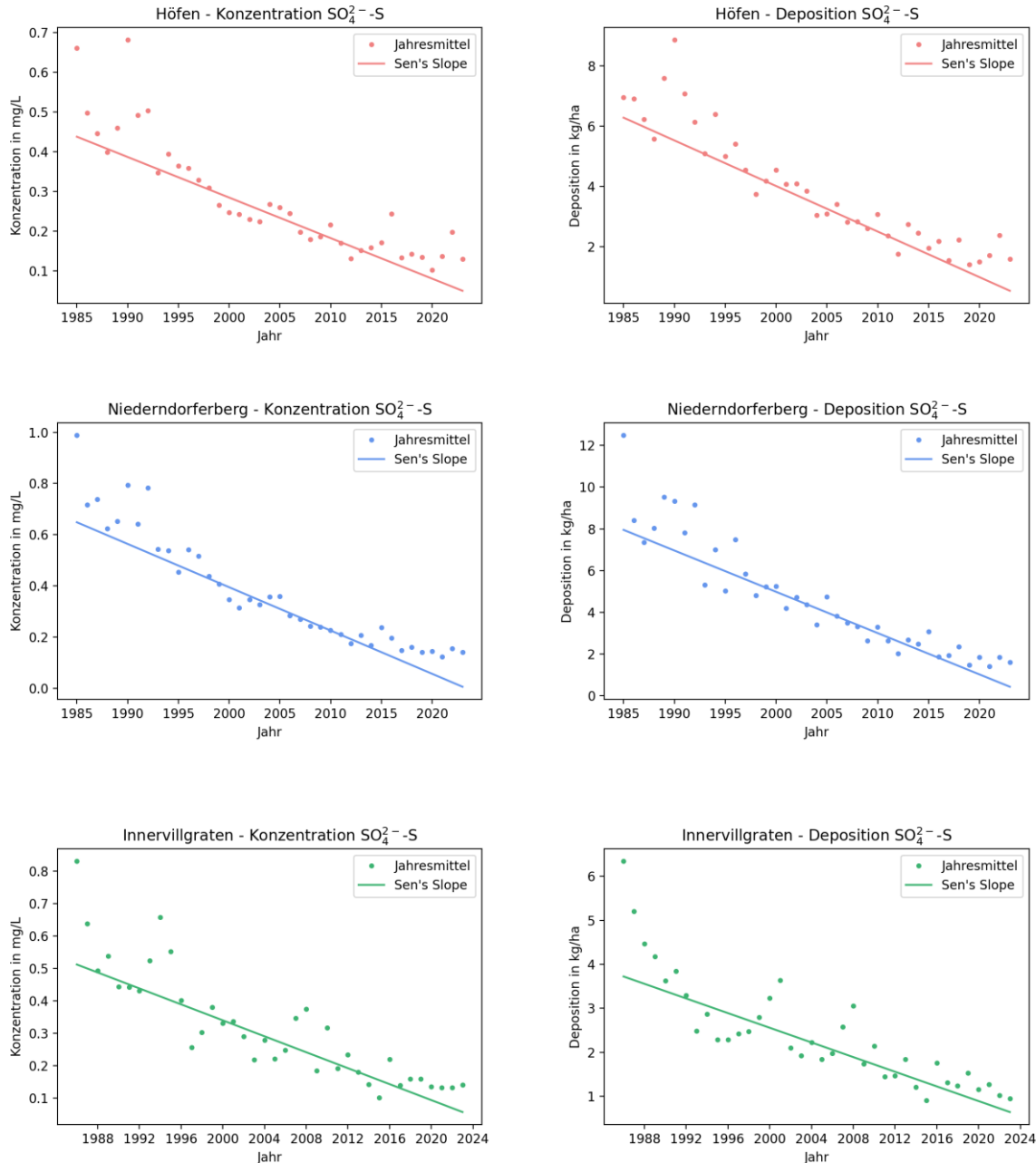


Abbildung 18: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Sulfat-S seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.4. Entwicklung der Ammoniumkonzentration und der Ammoniumdeposition

In der aktuellen Untersuchungsperiode wurde wie in den vergangenen Jahren der höchste Jahresmittelwert der Ammoniumkonzentration in Innervillgraten bestimmt, während Höfen weiterhin den geringsten Jahresmittelwert zeigt (Abb. 19). Die Erhöhung der Ammoniumkonzentration in Innervillgraten kann auf die Messungen der Monate März, Mai und August zurückgeführt werden.

Der zeitliche Verlauf des Ammoniumeintrags zeigt geringere Unterschiede zwischen den Stationen als der Verlauf der Konzentrationswerte. (Abb. 20).

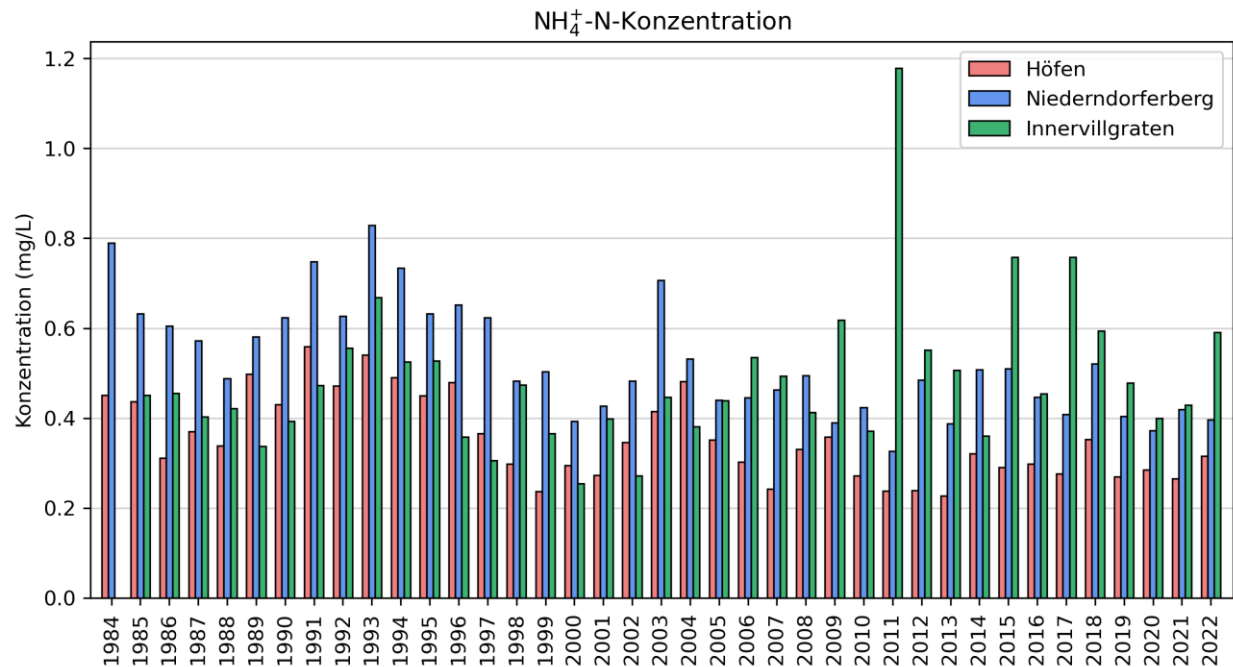


Abbildung 19: Jahresmittelwerte der Konzentration an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

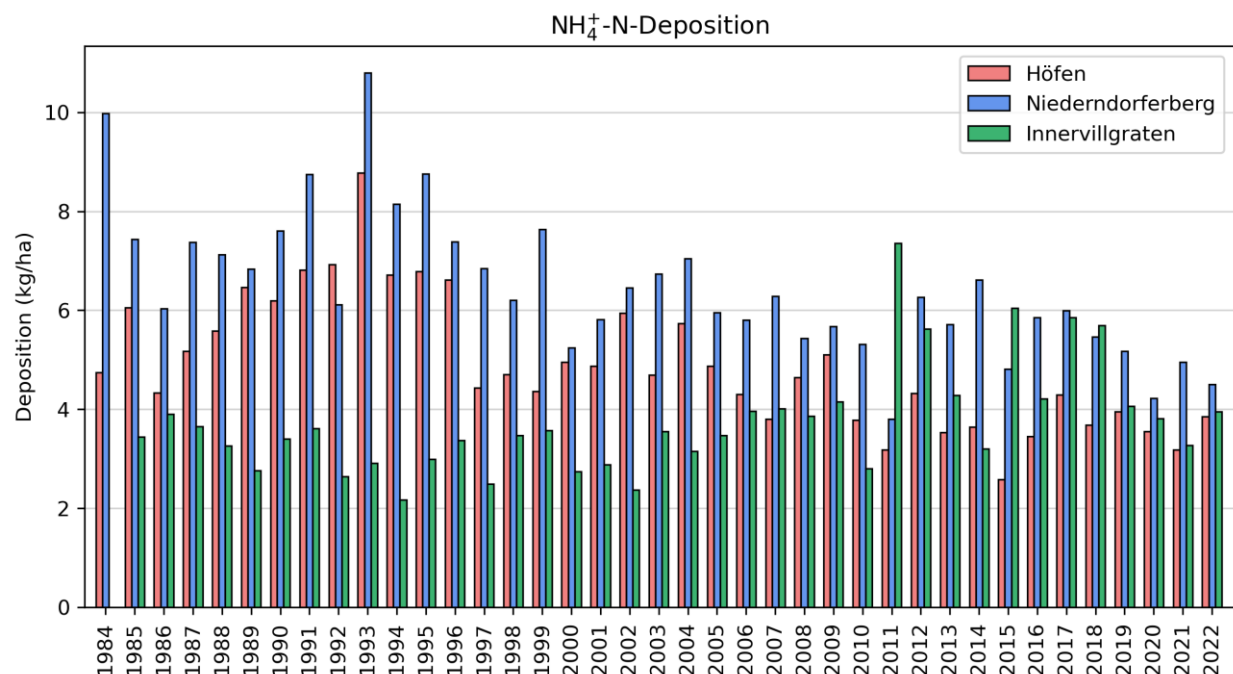


Abbildung 20: Einträge an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Seit Beginn der Untersuchungen sind für Höfen und Niederndorferberg signifikant fallende Trends sowohl für die Konzentrations- als auch für die Depositionswerte von Ammonium feststellbar (Abb. 21). Über den gesamten Untersuchungszeitraum lagen die Abnahmen der Konzentrationswerte bei 0,2 mg $\text{NH}_4^+\text{-N/L}$ (Höfen) beziehungsweise 0,3 mg $\text{NH}_4^+\text{/L}$ (Niederndorferberg). Die Abnahmen der Depositionswerte für $\text{NH}_4^+\text{-N}$ lagen bei 3,1 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/ha}$ (Höfen) und 3,3 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/ha}$ (Niederndorferberg). Für die Messstelle Innervillgraten konnte kein signifikanter Trend der Konzentrationswerte festgestellt werden, weshalb in der entsprechenden Abbildung keine Trendlinie eingezeichnet wurde. Der Trend der Depositionswerte für Ammonium ist signifikant und zeigt anders als an den Nordtiroler Stationen, eine signifikante Zunahme, die über den gesamten Beobachtungszeitraum bei 1,4 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/ha}$ liegt. Diese Änderung ist offensichtlich auf eine geänderte landwirtschaftliche Nutzung der unmittelbaren Umgebung der Station zurückzuführen.

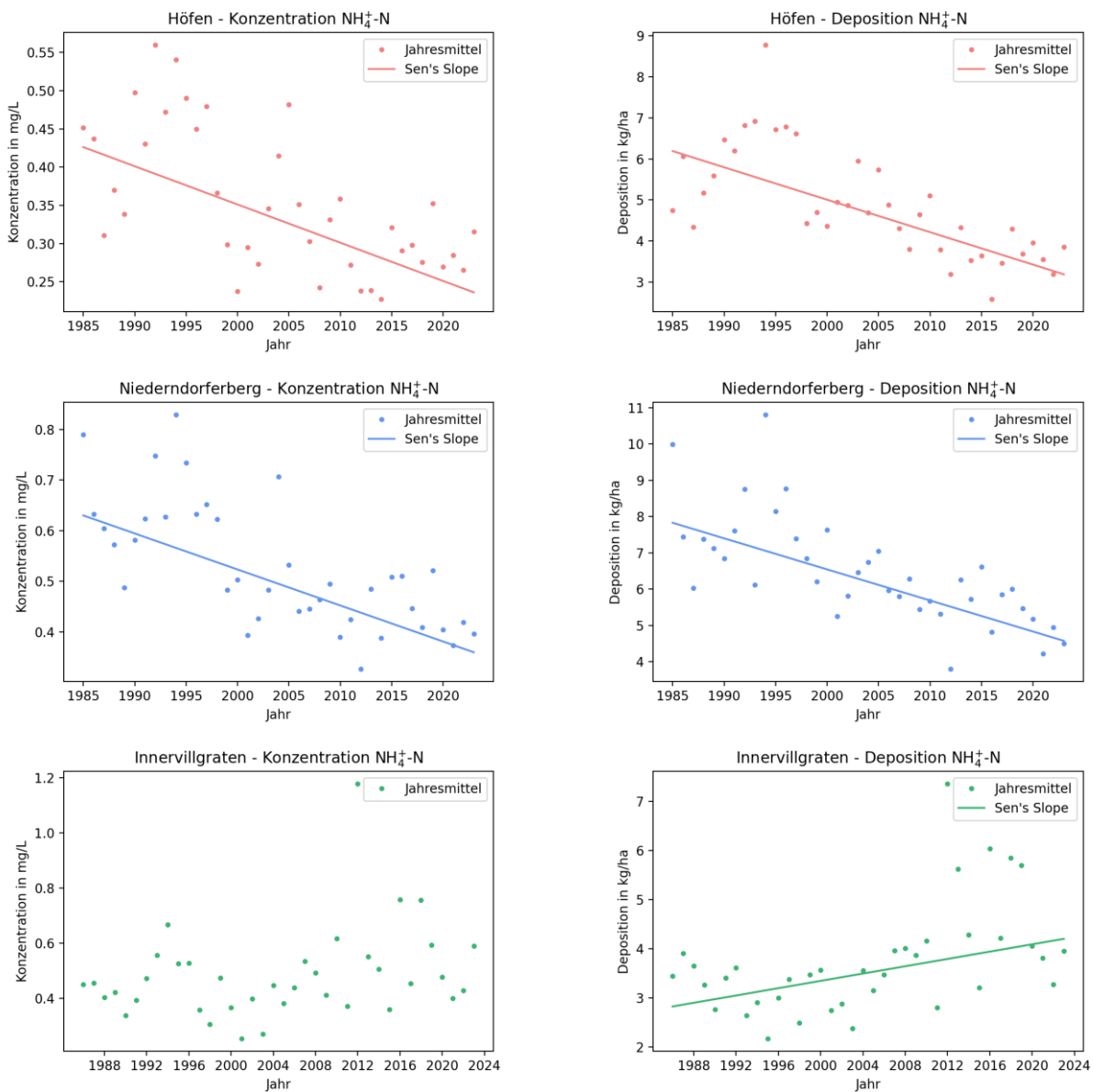


Abbildung 21: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Ammonium-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.5. Entwicklung der Nitratkonzentration und Nitratdeposition

In Niederndorferberg werden seit Beginn der Messungen immer die höchsten, in Innervillgraten zumeist die geringsten Jahresmittel der Konzentrationswerte für Nitrat-N bestimmt (Abb. 22). Diese Reihung der Messpunkte ist auch für die Depositionswerte zu erkennen, wobei der Unterschied zwischen Innervillgraten und den Stationen am Alpennordrand deutlicher ist. (Abb. 23).

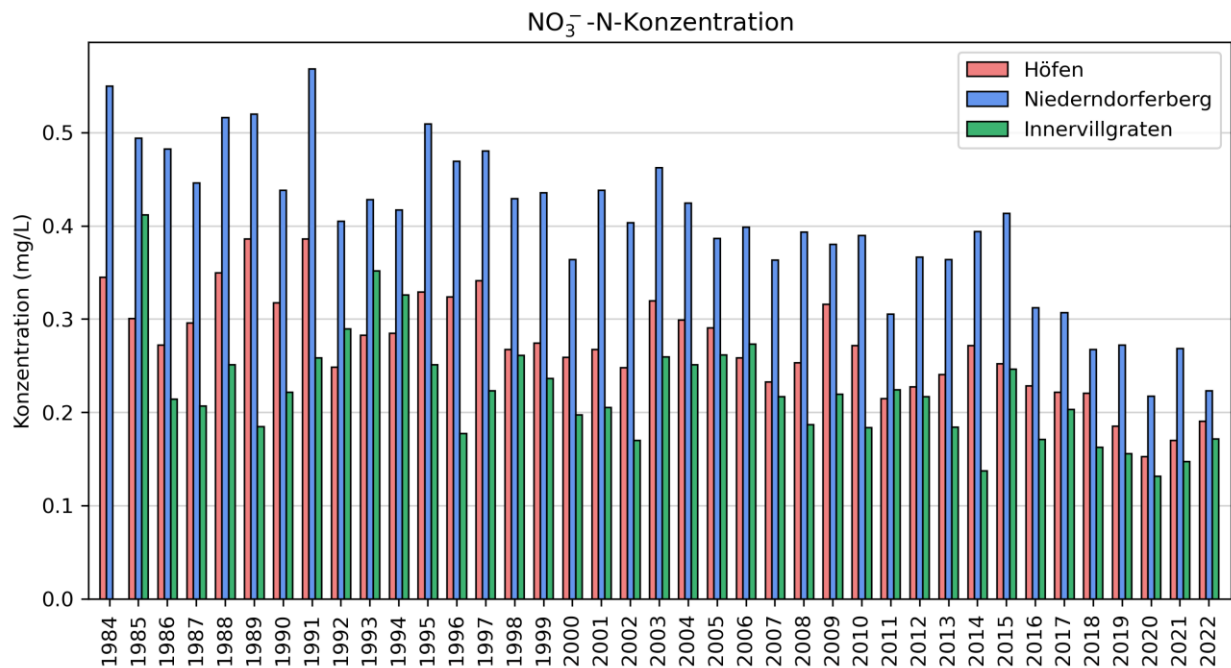


Abbildung 22: Jahresmittelwerte der Konzentration an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

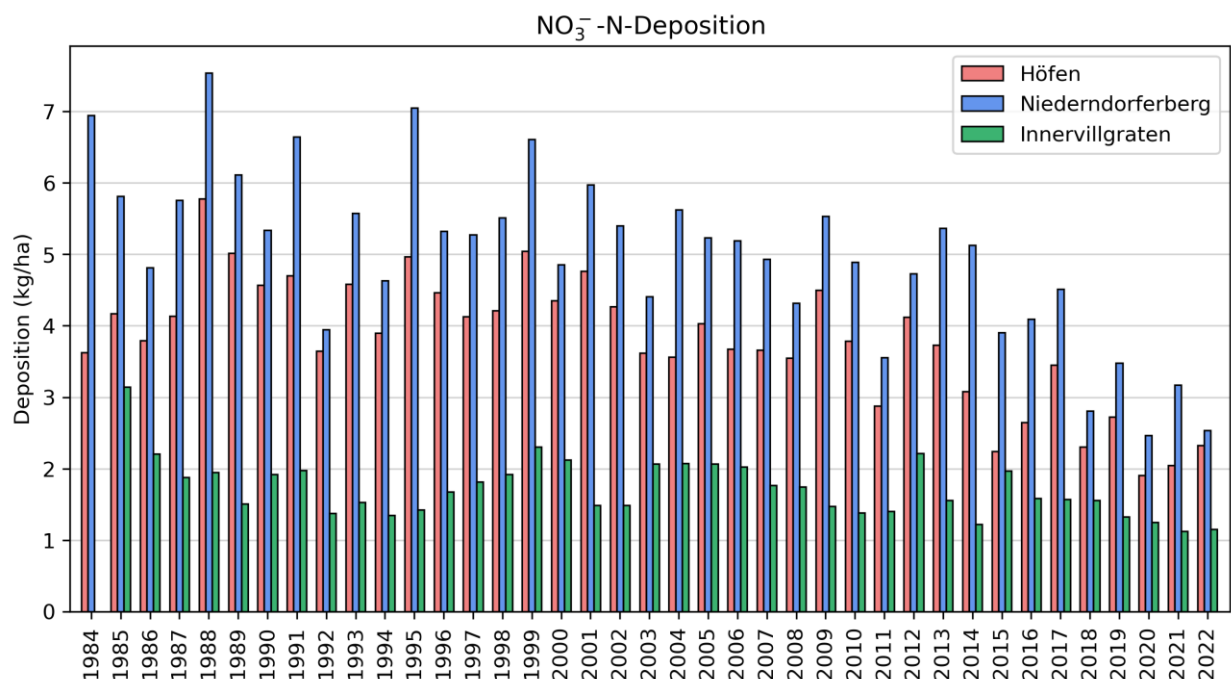


Abbildung 23: Einträge an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Die Konzentrationswerte und Depositionswerte von Nitrat-N zeigen für alle Messstellen in Tirol signifikant fallende Trends (Abb. 24). Die Abnahmen über den gesamten Messzeitraum lagen in Höfen und Innervillgraten bei 0,1 mg NO_3^- -N/L und in Niederndorferberg bei 0,3 mg NO_3^- -N/L. Für die Deposition beträgt, wenn der gesamte Untersuchungszeitraum betrachtet wird, die Abnahme der deponierten Stoffmengen in Höfen ca. 2,4 kg NO_3^- -N/ha und in Niederndorferberg ca. 3,1 kg NO_3^- -N/ha. In Innervillgraten wurde für die Depositionsmengen eine Abnahme von ca. 0,6 kg NO_3^- -N/ha festgestellt.

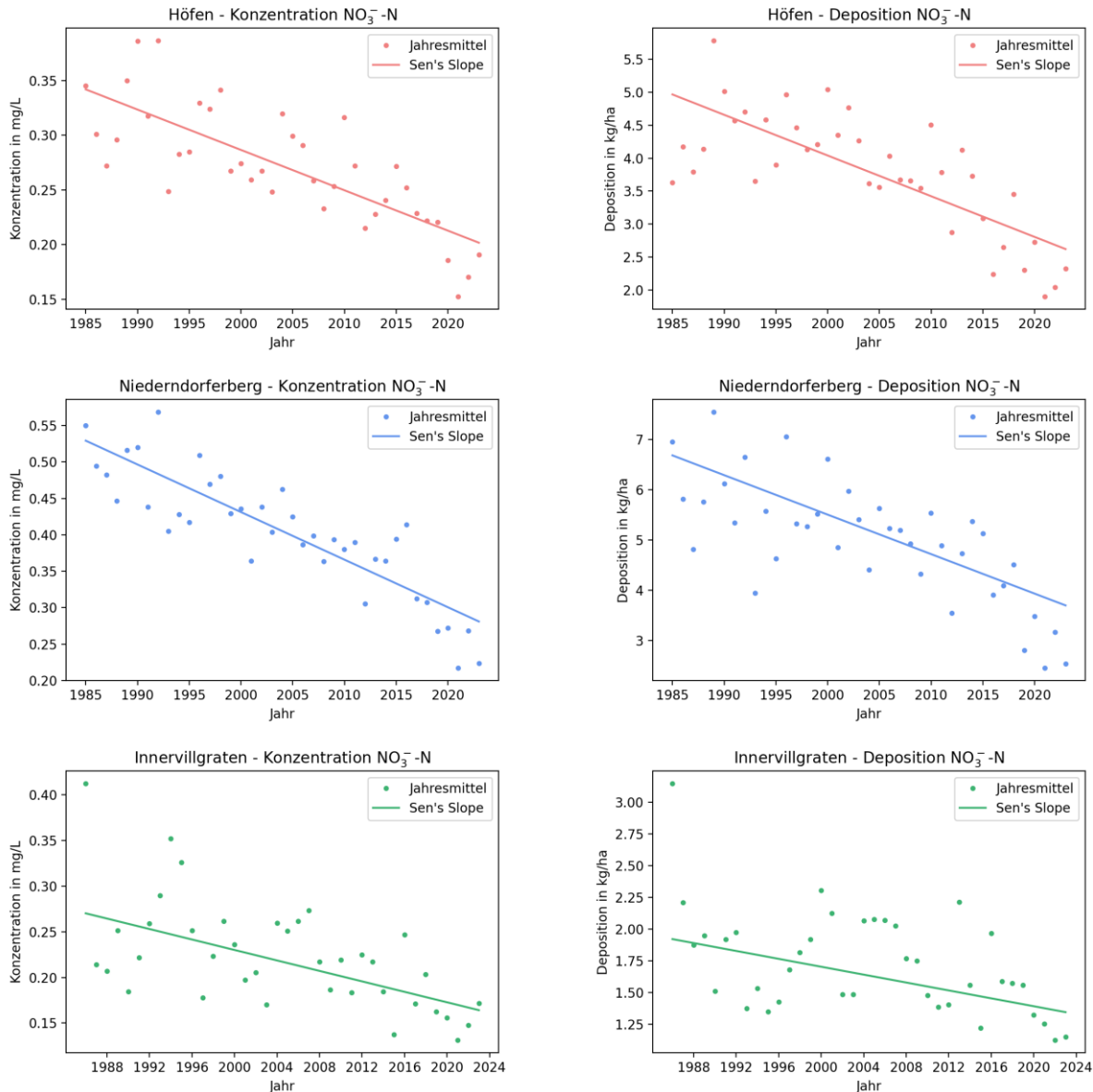


Abbildung 24: Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Nitrat-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

3.3.6. Entwicklung der Gesamtstickstoff-Konzentration und des Gesamtstickstoffeintrags

Die Gesamtstickstoffkonzentration und der Gesamtstickstoffeintrag setzen sich aus den Beiträgen von Ammonium-N und Nitrat-N zusammen. An den Nordtiroler Messstellungen, Höfen und Niederndorferberg, sind die Verhältnisse der Gesamtstickstoffkonzentrationen zwischen Ammonium-N und Nitrat-N eher ausgeglichen (1,7:1 bzw. 1,8:1), während in Innervillgraten der Anteil von Ammonium-N stark überwiegt (3,4:1). Die größere Bedeutung von Ammonium-N bedingt auch, dass die Konzentrationswerte des Gesamtstickstoffs in den letzten Jahren stärkeren Schwankungen unterlagen (Abb. 25). In der aktuellen Saison lag der Gesamtstickstoffeintrag durch die nasse Deposition zwischen 5,1 und 7,0 kg N/ha. Der höchste Gesamtstickstoffeinträge wurden auch in diesem Jahr in Niederndorferberg bestimmt (Abb. 26 und Tabelle 11).

Der Gesamtstickstoffeintrag (N_{gesamt}) stellt eine aus ökologischer Sicht wichtige Kenngröße dar. In der Literatur sind Richtwerte für kritische Gesamtstickstoffeinträge (Critical Loads) in empfindliche Ökosysteme definiert (WHO 1995, Nagel und Gregor 1999). Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/Jahr werden gemäß dem Critical Load-Konzept als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen.

Zur Beschreibung der Gesamtdeposition in ein Ökosystem sind neben der nassen Deposition (Eintrag durch Regen und Schnee) auch die Eintragswege über die trockene Deposition (direkter Eintrag reaktiver Gase bzw. Partikel) und über die okkulte Deposition (Interzeption von Nebelwasser) zu berücksichtigen. Der gesamte Eintrag an eutrophierendem (reaktivem) Stickstoff kann daher wesentlich höher sein als hier gemessen. In der Vergangenheit wurden umfassende Untersuchungen zur Darstellung der relativen Beiträge aus nasser, trockener und okkultur Deposition in Tirol durchgeführt (z.B. Kalina et al. 2002), die diese Tatsache unterstreichen. Besondere Beachtung verdient der Nordalpenraum, wo erhöhte N-Einträge besonders Nährstoffungleichgewichte und die Destabilisierung von Waldökosystemen fördern. Im Grünland sind derartige Nährstoffungleichgewichte aufgrund der schnelleren Anpassung der Vegetation (insbesondere bei Gräsern) von geringerer Bedeutung, jedoch aber für die Vegetation in nährstoffarmen Feuchtplächen oder Trockenrasen.

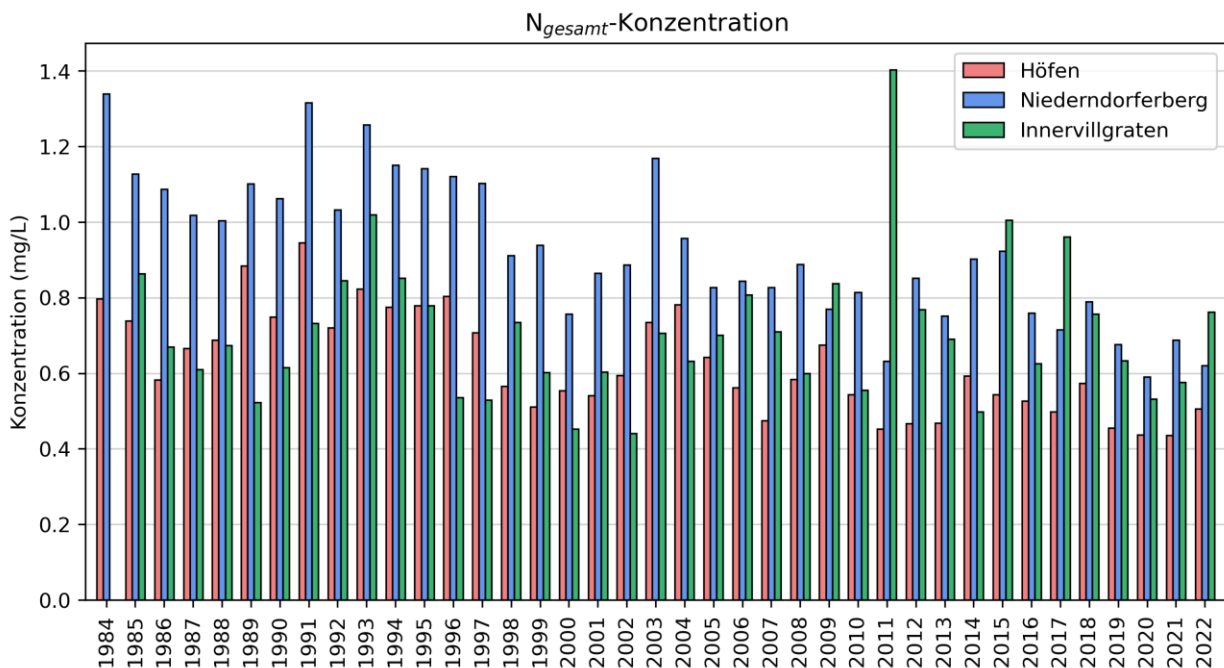


Abbildung 25: Jahresmittelwerte der Konzentration an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

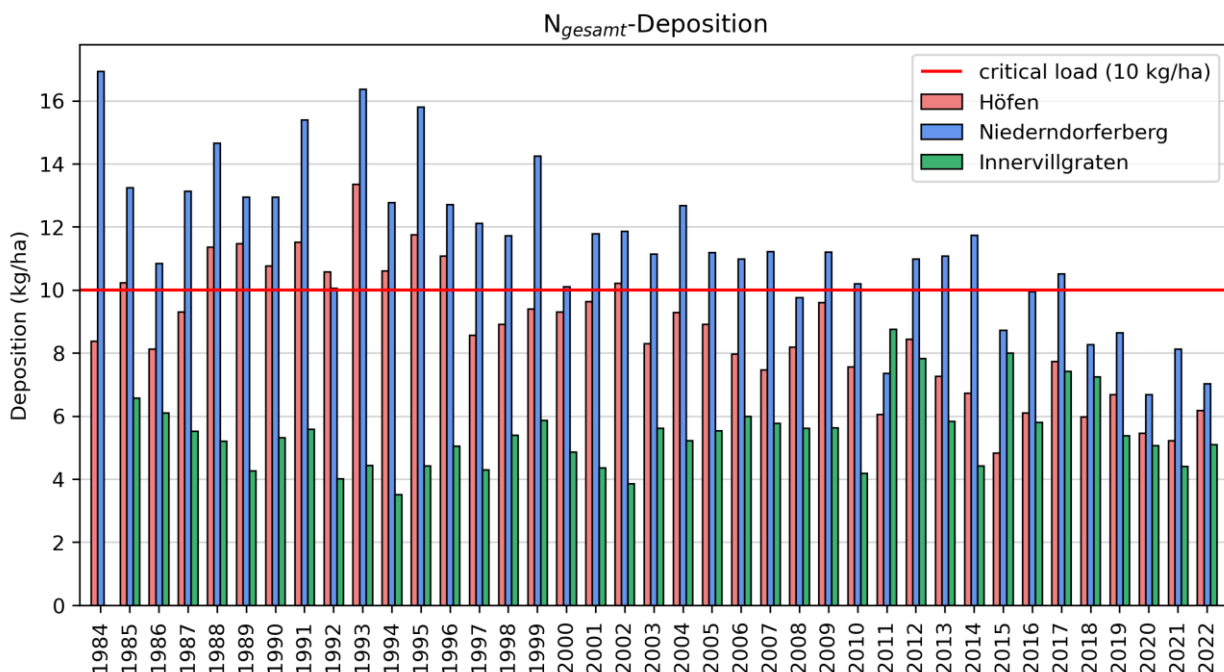


Abbildung 26: Eintrag an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

An den Messstellen Höfen und Niederndorferberg sind die Trends der Konzentrationswerte von Gesamt-N signifikant fallend und die Abnahme seit Beginn der Untersuchungsperiode liegt bei 0,3 mg N/L und 0,5 mg N/L. Des weiteren bestehen für die Messstellen Höfen und Niederndorferberg signifikante Trends in den Depositionswerten des Gesamtstickstoffs. Über den gesamten Beobachtungszeitraum von 1984 bis 2022 wird für Höfen und Niederndorferberg eine theoretische Abnahme der Depositionsmengen von 6,1 kg N/ha bzw. 6,4 kg N/ha berechnet. Für die Messstelle Innervillgraten konnte weder für die Gesamtstickstoffkonzentration noch -deposition ein signifikanter Trend berechnet werden.

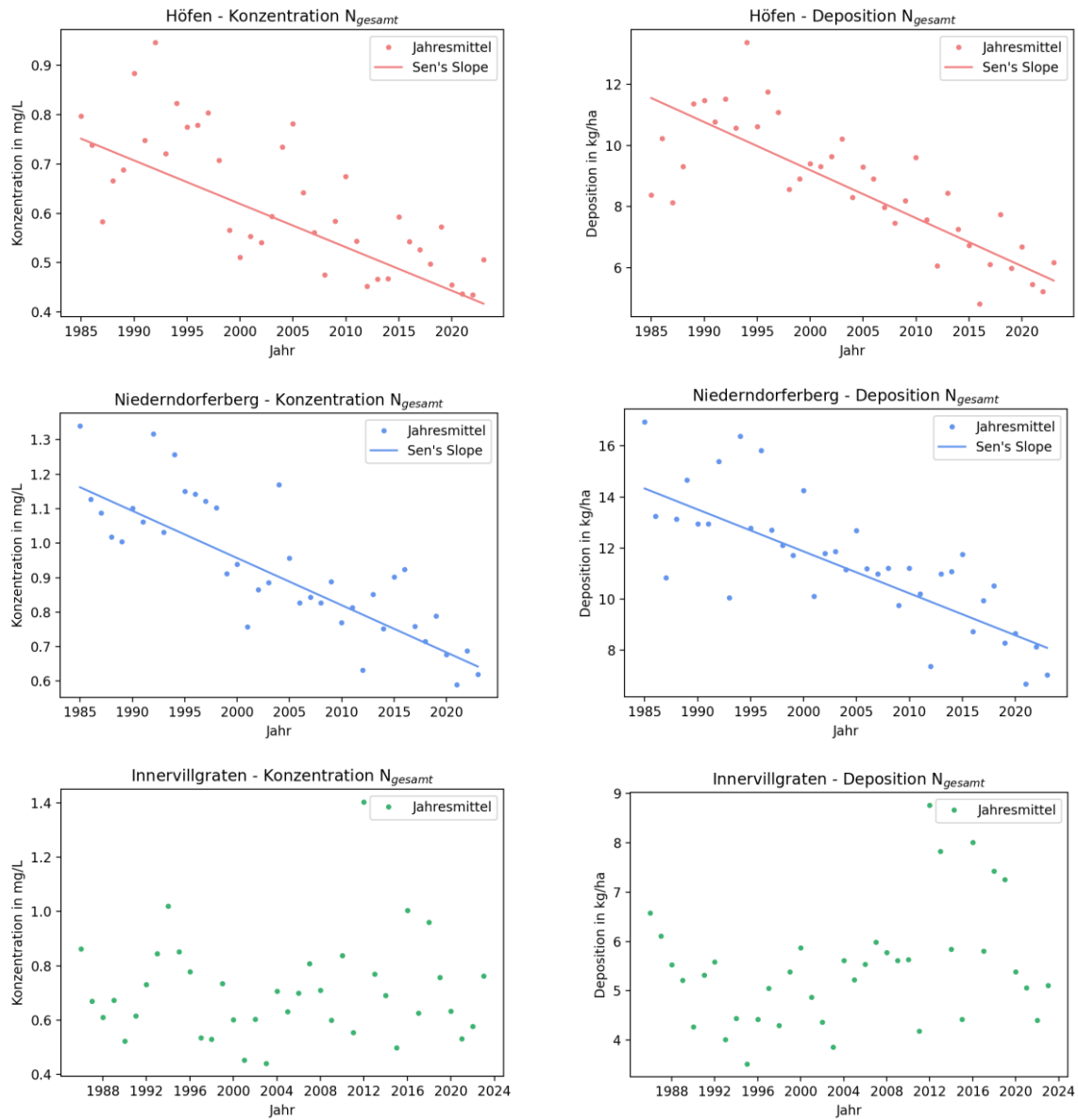


Abbildung 27: Trendverläufe für die nasse Deposition von Gesamt-N seit Beginn der Messungen.

Tabelle 11: Stickstoffeinträge durch nasse Deposition ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) an den Stationen im Untersuchungsgebiet zusammen mit Critical Loads für den Gesamtstickstoffeintrag (N_{gesamt}).

Untersuchungs- periode	Stickstoffeintrag [kg/ha.a] (nasse Deposition von $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$)		
	Höfen	Niederndorferberg	Innervillgraten
1984	8,4	16,9	-
1985	10,2	13,3	6,6
1986	8,1	10,8	5,6
1987	9,3	13,1	5,5
1888	11,4	14,7	5,2
1989	11,5	13,0	4,3
1990	10,8	12,9	5,3
1991	11,6	15,4	5,6
1992	10,6	10,1	4,0
1993	13,4	16,4	4,4
1994	10,6	12,8	3,5
1995	11,7	15,8	4,4
1996	11,1	12,7	5,1
1997	8,6	12,1	4,3
1998	8,9	11,7	5,4
1999	9,4	14,2	5,9
2000	9,3	10,1	4,9
2001	9,6	11,8	4,4
2002	10,2	11,9	3,9
2003	8,3	11,1	5,6
2004	9,3	12,7	5,2
2005	8,9	11,2	5,5
2006	8,0	11,0	6,0
2007	7,5	11,2	5,8
2008	8,2	9,8	5,6
2009	9,6	11,1	5,6
2010	7,6	10,2	4,1
2011	6,1	7,4	8,8
2012	8,4	11,0	7,8
2013	7,3	11,1	5,8
2014	6,7	11,7	4,4
2015	4,7	8,7	8,0
2016	6,1	9,9	5,8
2017	7,7	10,5	7,4
2018	6,1	8,3	7,3
2019	6,7	8,7	5,4
2020	5,5	6,7	5,1
2021	5,2	8,1	4,4
2022	6,2	7,0	5,1
Critical Loads für N_{gesamt}	10 kg/ha.a (WHO 1995)		

3.4. Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern

Hier werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Nassen Deposition in Tirol, Salzburg, Niederösterreich und der Steiermark gemeinsam dargestellt. In Tabelle 12 sind die mit den Niederschlagsmengen gewichteten mittleren Konzentrationsmittelwerte und in Tabelle 13 die Depositionsmengen (Einträge) im Jahr 2022 angegeben.

Abbildung 1 gab bereits einen Überblick über die Schwefel- und Stickstoffeinträge im Jahr 2022. Die detailliertere Darstellung der Eintrags- und Konzentrationswerte für Sulfat-Schwefel, Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff erfolgt in Abbildung 28 bis Abbildung 33. Diese Abbildungen zeigen sowohl die Mittelwerte der letzten 5 Jahre und die entsprechenden Werte der Saison 2022 zum Vergleich. Diese Unterschiede sollten immer im Zusammenhang mit den langfristigen Trends betrachtet werden, die im Abschnitt 3.3 dargestellt wurden. Dies verhindert, dass die von Jahr zu Jahr möglichen Schwankungen zu stark bewertet werden.

Im Überblick über alle gezeigten Stationen betragen die mittleren Konzentrationswerte 0,10 bis 0,27 mg/L für Sulfat-Schwefel, 0,11 bis 0,39 mg/L für Nitrat-Stickstoff und 0,19 bis 0,94 mg/L für Ammonium-Stickstoff. Die geringsten Konzentrationswerte werden jeweils an der hochalpinen Messstelle Sonnblick gemessen. Da die Konzentrationswerte für Ammonium-Stickstoff stärker durch lokale Effekte geprägt werden, zeigt diese Komponenten die größten Unterschiede zwischen den Messpunkten der vier Bundesländer.

Der Eintrag durch Nasse Deposition ist sowohl von den Konzentrationswerten als auch von der gefallen Wassermenge abhängig. Ein Beispiel für die unterschiedlichen Niederschlagsmengen ist der Vergleich der Jahressummen der Messstellen Innervillgraten (Tirol, 670 mm Niederschlag) und Lunz am See (Niederösterreich, 1552 mm Niederschlag). Die höheren Niederschlagsmengen am Nordrand der Alpen bewirken auch größere Stoffeinträge. Der Überblick über alle Stationen zeigt Stoffeinträge von 0,9 bis 2,4 kg/ha für Sulfat-Schwefel, 0,9 bis 3,7 kg/ha für Nitrat-Stickstoff und 1,2 bis 6,5 kg/ha für Ammonium-Stickstoff. Aufgrund der hohen Niederschlagsmenge stellen die Stoffeinträge an der hochalpinen Messstelle Sonnblick nun nicht mehr die geringsten Werte dar.

In Tirol liegen die im Untersuchungsjahr 2022 bestimmten Einträge bei 0,9 bis 1,6 kg/ha Sulfat-Schwefel und 5,1 bis 7,0 kg/ha für Gesamt-Stickstoff (Summe aus Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff). Der Schwefeleintrag hat sich seit dem Vorjahr kaum verändert und ist etwas geringer als an manchen der weiter östlich liegenden Messpunkte. Für Gesamt-Stickstoff sind die Unterschiede zwischen der in Tirol am geringsten (Innervillgraten) und stärksten (Niederndorferberg) belasteten Station in diesem Jahr geringer als in 2021. Die Stoffeinträge entsprechen den übrigen in Österreich gemessenen Werten.

Tabelle 12: Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten mengengewichteten Jahresmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022. *Die Stationen Hollabrunn (Niederösterreich) und Klöch (Steiermark) sind erst seit Juni und März 2022 in Betrieb

Station	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[µg/L]				[mg/L]				
Tirol:											
Höfen	1220	6,1	0,80	0,09	0,32	0,06	0,73	0,10	0,15	0,19	0,13
Niederndorferberg	1136	5,7	1,87	0,11	0,40	0,08	0,46	0,04	0,18	0,22	0,14
Innervillgraten	670	6,0	1,02	0,07	0,59	0,09	0,33	0,04	0,11	0,17	0,14
Salzburg:											
Haunsberg	695	6,4	0,36	0,32	0,94	0,23	1,83	0,34	0,30	0,39	0,24
Sonnblick	1542	5,3	4,70	0,07	0,19	0,04	0,26	0,02	0,10	0,11	0,10
Niederösterr.:											
Hollabrunn*	330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Litschau	437	5,6	2,80	0,21	0,28	0,06	0,43	0,04	0,20	0,21	0,21
Lunz am See	1552	5,2	6,65	0,11	0,21	0,04	0,27	0,03	0,19	0,24	0,15
Ostrong	831	5,5	2,82	0,09	0,48	0,04	0,27	0,03	0,16	0,27	0,22
Steiermark:											
Arnfels	711	5,6	2,46	0,09	0,39	0,10	0,24	0,04	0,11	0,24	0,24
Grundlsee	1145	5,8	1,57	0,16	0,44	0,47	0,10	0,04	0,26	0,22	0,15
Klöch*	608	5,6	2,78	0,10	0,41	0,09	0,30	0,04	0,12	0,28	0,27
Masenberg	563	5,8	1,72	0,10	0,42	0,16	0,30	0,05	0,14	0,22	0,22

Tabelle 13: Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten Jahreseinträge der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022. *Die Stationen Hollabrunn (Niederösterreich) und Klöch (Steiermark) sind erst seit Juni und März 2022 in Betrieb

Station	NS	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
	[mm]	[-]	[g/ha]				[kg/ha]				
Tirol:											
Höfen	1220	6,1	9,7	1,1	3,8	0,7	8,9	1,2	1,8	2,3	1,6
Niederndorferberg	1136	5,7	21,3	1,3	4,5	0,9	5,2	0,5	2,1	2,5	1,6
Innervillgraten	670	6,0	6,8	0,5	4,0	0,6	2,2	0,3	0,8	1,1	0,9
Salzburg:											
Haunsberg	695	6,4	2,5	2,2	6,5	1,6	12,7	2,3	2,1	2,7	1,7
Sonnblick	1542	5,3	72,5	1,1	2,9	0,7	4,0	0,4	1,6	1,7	1,5
Niederösterr.:											
Hollabrunn*	330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Litschau	437	5,6	12,2	0,9	1,2	0,3	1,9	0,2	0,9	0,9	0,9
Lunz am See	1552	5,2	103,3	1,7	3,3	0,6	4,2	0,5	3,0	3,7	2,4
Ostrong	831	5,5	23,5	0,8	4,0	0,3	2,2	0,2	1,3	2,2	1,8
Steiermark:											
Arnfels	711	5,6	17,5	0,6	2,8	0,7	1,7	0,3	0,8	1,7	1,7
Grundlsee	1145	5,8	17,9	1,9	5,0	5,3	1,2	0,5	2,9	2,5	1,8
Klöch*	608	5,6	16,8	0,6	2,5	0,5	1,8	0,2	0,7	1,7	1,6
Masenberg	563	5,8	9,7	0,6	2,3	0,9	1,7	0,3	0,8	1,3	1,2

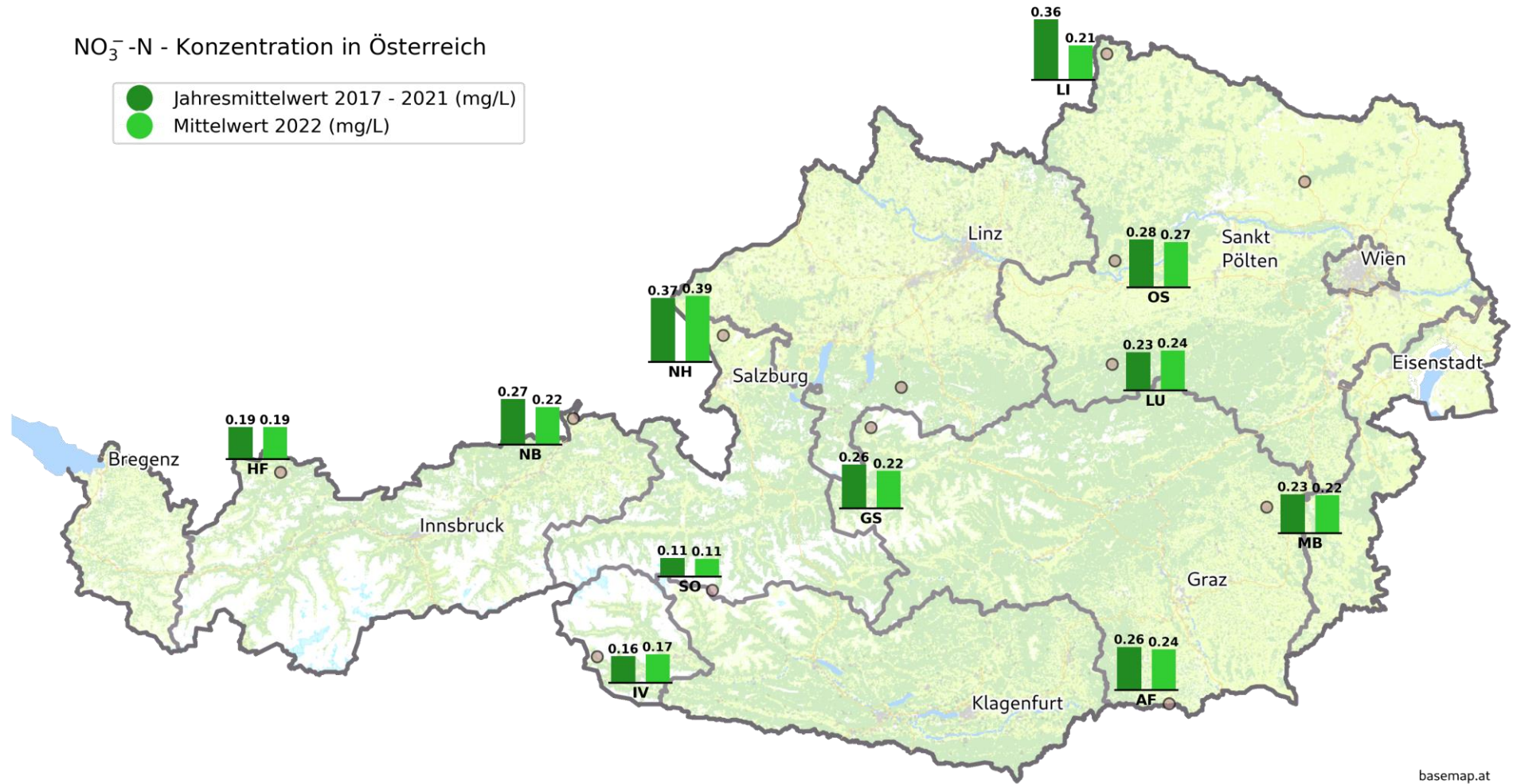


Abbildung 28: Räumliche Verteilung der mengengewichteten NH₄⁺-N-Jahreskonzentrationen für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre.

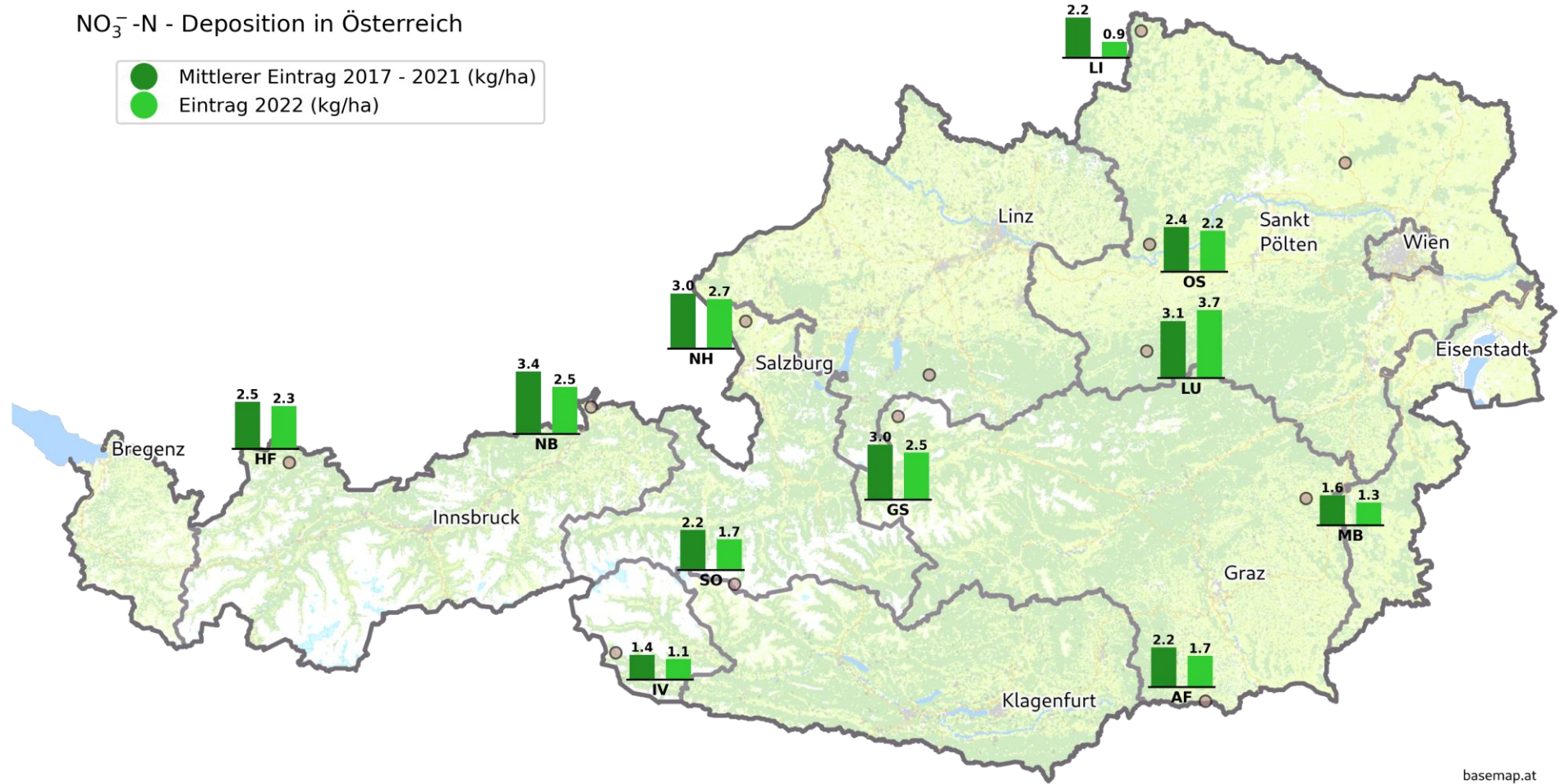


Abbildung 29: Räumliche Verteilung der NH₄⁺-N-Jahreseinträge für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre.

NH₄⁺-N - Konzentration in Österreich

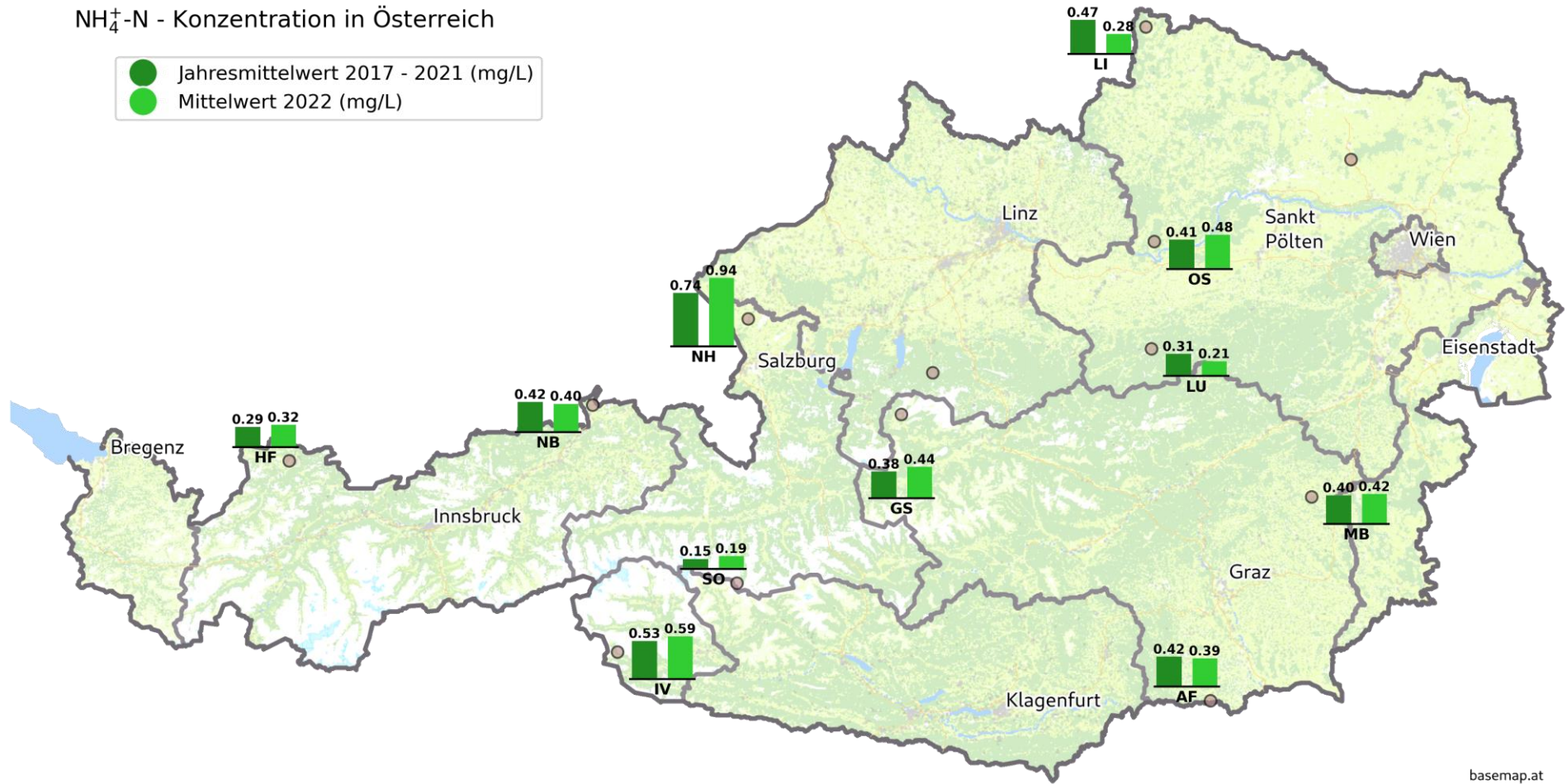


Abbildung 30: Räumliche Verteilung der mengengewichteten NO₃⁻-N-Jahreskonzentrationen für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahr

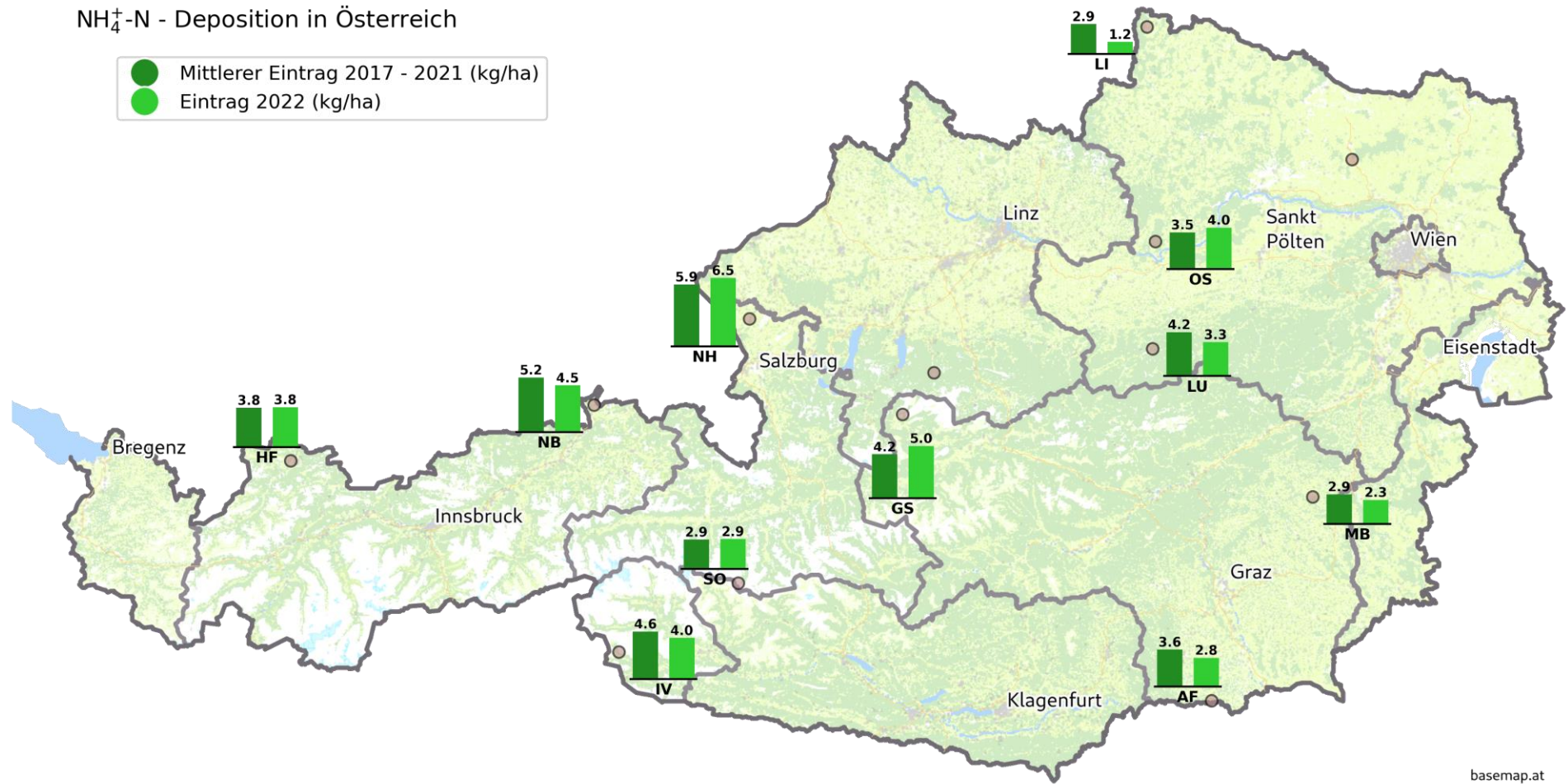


Abbildung 31: Räumliche Verteilung der NO₃-N-Jahreseinträge für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre.

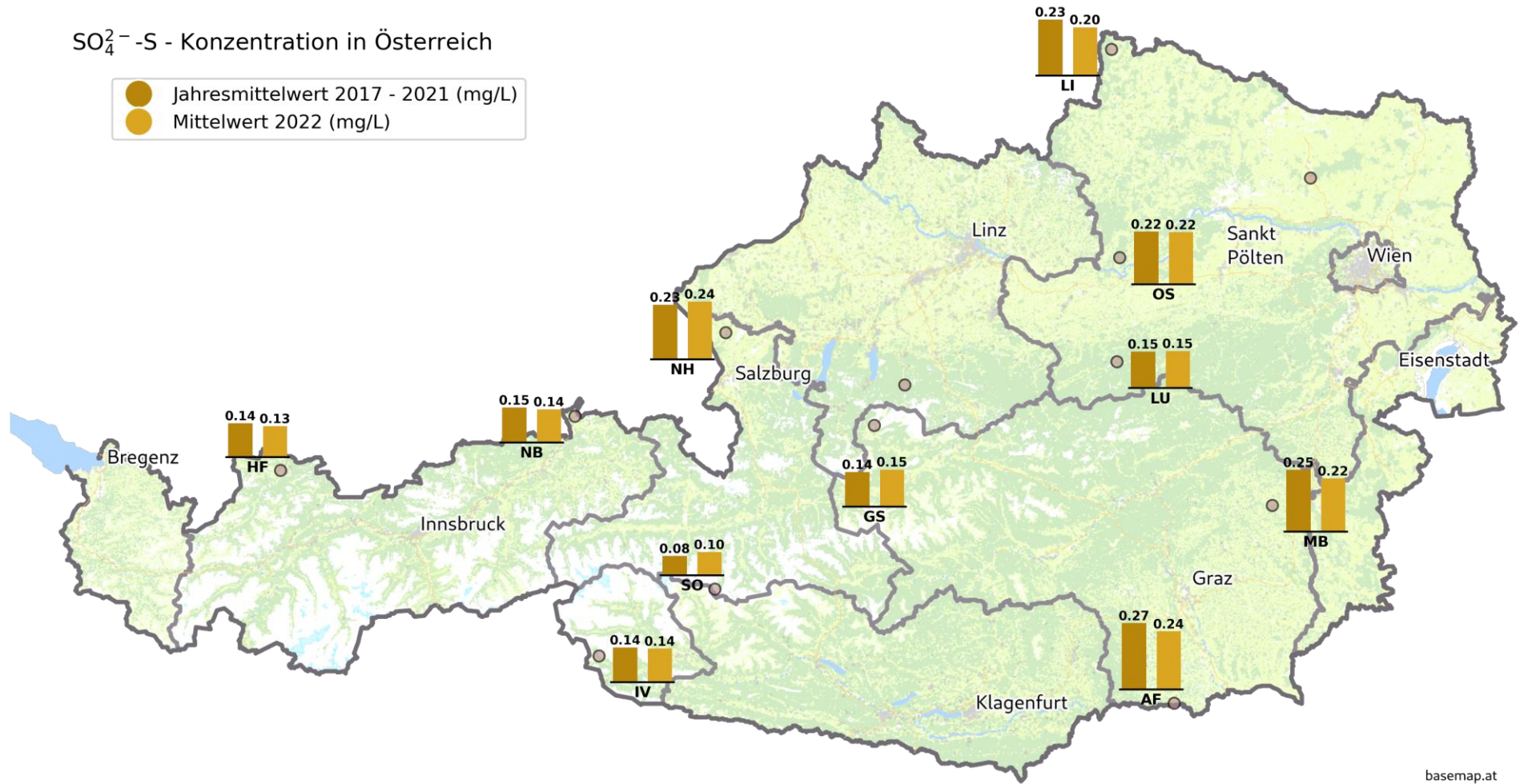


Abbildung 32: Räumliche Verteilung der mengengewichteten SO₄²⁻-S-Jahreskonzentrationen für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre.

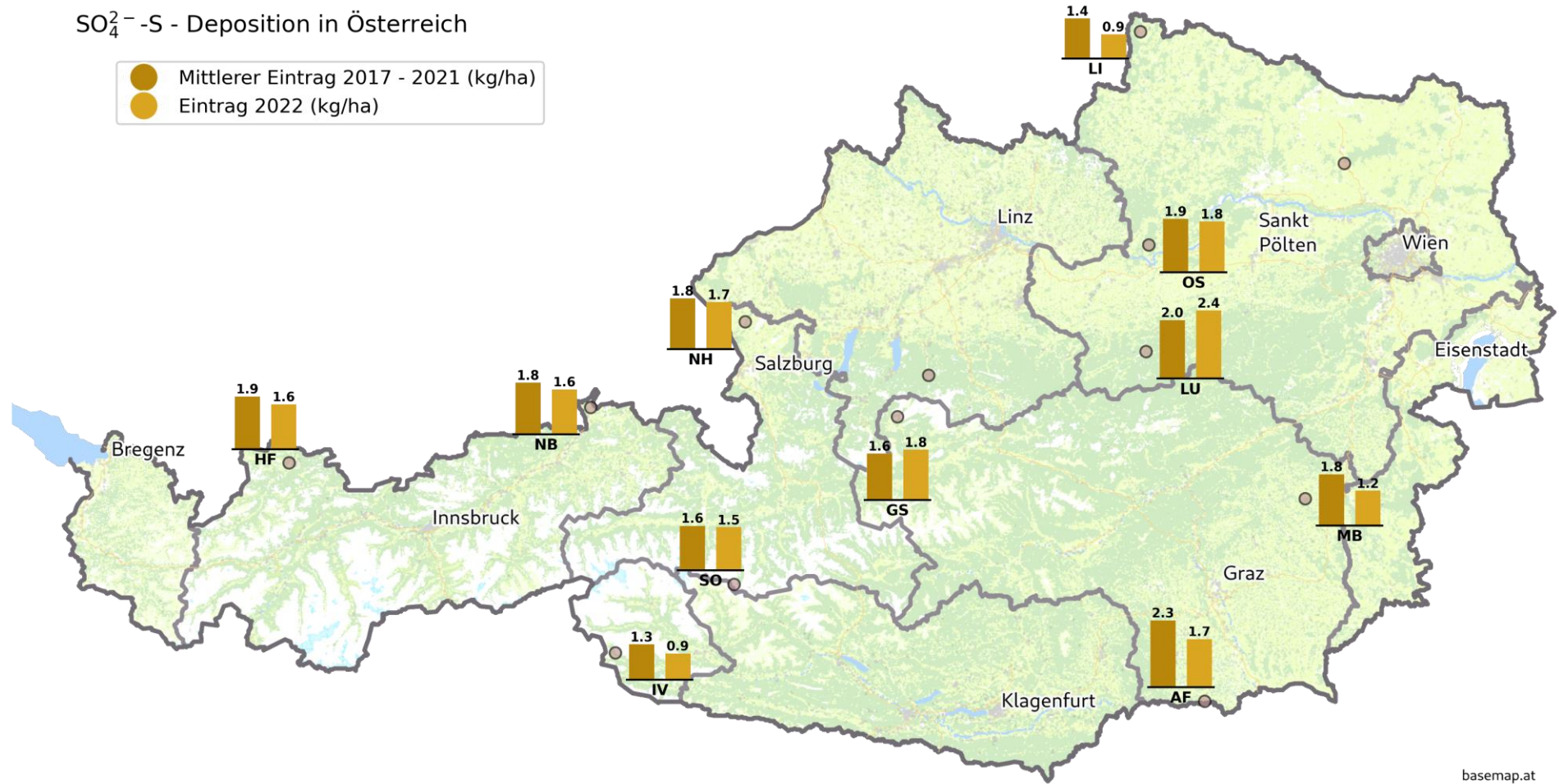


Abbildung 33: Räumliche Verteilung der SO₄²⁻-S-Jahreseinträge für den Zeitraum Jänner 2022 bis Dezember 2022 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre.

3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen

Die Auswertung der Tagesproben zeigt eine hohe Variabilität der täglichen Niederschlagsmengen, der Konzentrationswerte und entsprechend auch der täglichen Depositionsmengen. Daher wurden Häufigkeitsverteilungen und zusätzliche Parameter zur Beschreibung der Messwertverteilungen erstellt. Aufgrund der Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen wurden logarithmisch skalierte Niederschlagsklassen verwendet.

Zur Beschreibung der asymmetrischen Verteilungen der Messwerte eignen sich Perzentilwerte und davon abgeleitete Parameter als Lokalisations- und Dispersionsmaßzahlen. Eine kurze Erläuterung zu diesen Maßzahlen und die dazugehörigen Auswertungen befindet sich im Anhang (Tabellen A 28 bis A 31).

Die Häufigkeiten der täglichen Niederschlagsmengen sind in den Abbildungen 34 bis 36 dargestellt. Erkennbar ist, dass Tage mit sehr niedrigen bzw. sehr hohen Niederschlagsmengen selten auftreten und dass die Bereiche der Niederschlagsmengen an den einzelnen Stationen unterschiedlich sind. Die Tabelle 14 listet die in den Abbildungen gezeigten absoluten Häufigkeiten sowie die relativen Häufigkeiten der Niederschlagsklassen und Niederschlagsmengen auf. Betrachtet man Tage mit mehr als 16 mm Niederschlag, so fielen in Höfen an 22 Tagen (nur 15% aller Regentage) 51% des Jahresniederschlags, in Niederndorferberg an 18 Tagen (14% aller Regentage) 42 % des Jahresniederschlags und in Innervillgraten an 9 Tage (8% aller Regentage) 29% des Jahresniederschlags. (vergleiche Tabellen 14 – 16).

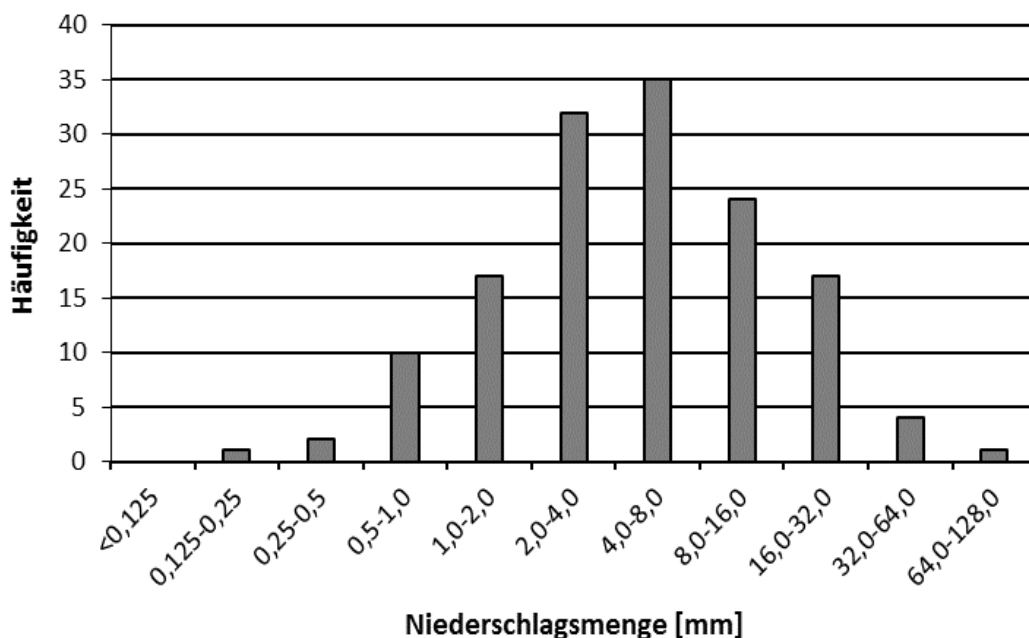


Abbildung 34: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle **Höfen**.

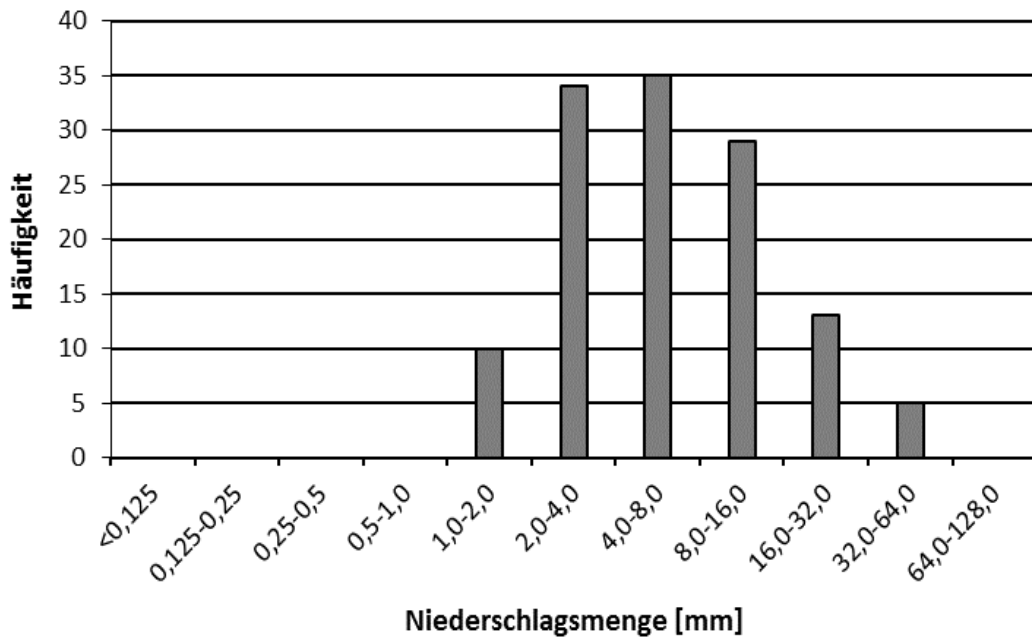


Abbildung 35: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle **Niederndorferberg**.

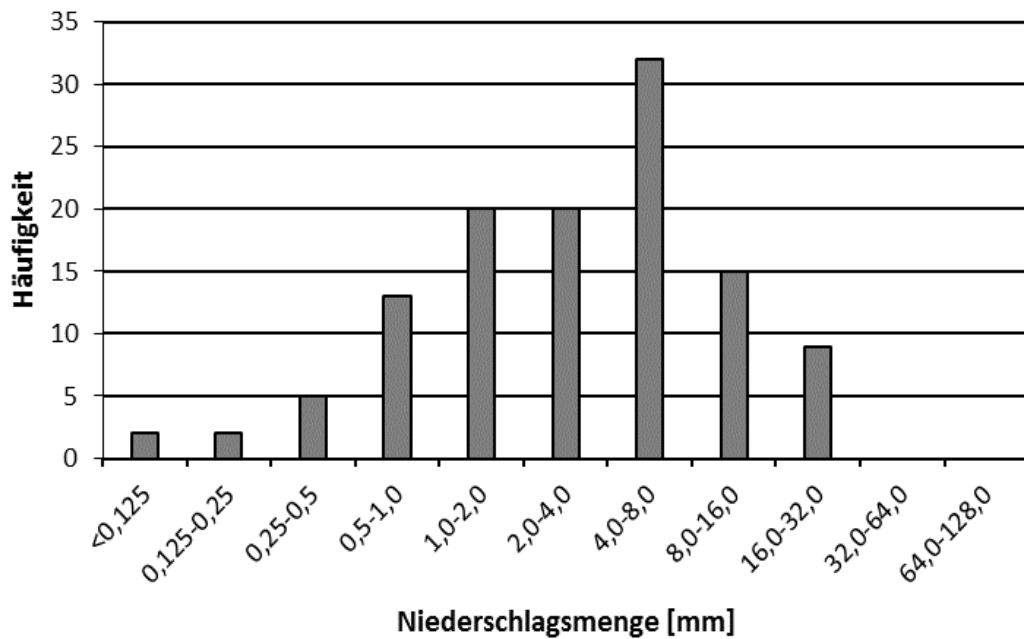


Abbildung 36: Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle **Innervillgraten**.

Tabelle 14: Absolute und relative Häufigkeit sowie Niederschlagsmenge in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse			Häufigkeit		Niederschlagsmenge	
[mm]			N	[%]	[mm]	[%]
Höfen						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	1	0,7	0,2	0,0
0,25	-	0,5	2	1,4	0,7	0,1
0,5	-	1	10	7,0	7,0	0,6
1	-	2	17	11,9	24,3	2,0
2	-	4	32	22,4	98,4	8,1
4	-	8	35	24,5	199,3	16,3
8	-	16	24	16,8	269,7	22,1
16	-	32	17	11,9	388,9	31,9
32	-	64	4	2,8	165,5	13,6
64	-	128	1	0,7	65,7	5,4
Niederndorferberg						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	-	-	-	-
0,25	-	0,5	-	-	-	-
0,5	-	1	-	-	-	-
1	-	2	10	7,9	15,3	1,3
2	-	4	34	27,0	100,5	8,9
4	-	8	35	27,8	209,5	18,4
8	-	16	29	23,0	336,0	29,6
16	-	32	13	10,3	281,1	24,7
32	-	64	5	4,0	193,2	17,0
64	-	128	-	-	-	-
Innervillgraten						
	bis	0,125	2	1,7	0,2	0,0
0,125	-	0,25	2	1,7	0,3	0,0
0,25	-	0,5	5	4,2	2,0	0,3
0,5	-	1	13	11,0	9,6	1,4
1	-	2	20	16,9	28,2	4,2
2	-	4	20	16,9	56,7	8,5
4	-	8	32	27,1	191,2	28,5
8	-	16	15	12,7	184,7	27,6
16	-	32	9	7,6	196,8	29,4
32	-	64	-	-	-	-
64	-	128	-	-	-	-

Mit zunehmender Niederschlagsmenge nehmen die Ionenkonzentrationen im Mittel ab. Während die Konzentrationswerte der Niederschlagsproben mit geringen Niederschlagsmengen stark streuen, weisen die Tagesproben mit hohen Niederschlagsmengen generell geringe Ionenkonzentrationen auf. Diese Beobachtung kann auf das „Auswaschen“ der Stoffe aus der Atmosphäre zurückgeführt werden.

Die Tabellen 15 bis 17 fassen die volumengewichteten Mittelwerte der Ionenkonzentrationen und die pH-Werte je Niederschlagsklasse zusammen. Da bei geringen Niederschlagsmengen teilweise nicht alle Analysen durchgeführt werden können, fehlen in den folgenden Tabellen einzelne Angaben.

Tabelle 15: Mittlerer pH Wert und mengengewichtete Konzentrationen in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]	[µg/L]				[mg/L]				
Höfen										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	0,72	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	0,83	-	-	-	0,24	0,48	0,30
1 - 2	5,9	1,13	0,23	0,54	0,08	0,79	0,19	0,49	0,39	0,20
2 - 4	6,2	0,62	0,19	0,40	0,06	0,85	0,20	0,29	0,28	0,15
4 - 8	6,1	0,78	0,11	0,39	0,07	0,78	0,15	0,14	0,26	0,17
8 - 16	6,0	0,93	0,11	0,31	0,11	1,32	0,12	0,17	0,19	0,15
16 - 32	6,1	0,84	0,06	0,22	0,03	0,43	0,07	0,11	0,15	0,09
32 - 64	6,1	0,72	0,06	0,32	0,04	0,55	0,06	0,08	0,13	0,12
64 - 128	6,2	0,62	0,03	0,41	0,03	0,18	0,04	0,05	0,19	0,13
Niederndorferberg										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,3	0,51	0,45	0,81	0,12	0,54	0,12	0,79	0,59	0,29
2 - 4	5,5	2,99	0,31	0,48	0,12	1,57	0,10	0,50	0,41	0,26
4 - 8	5,5	2,95	0,17	0,46	0,09	0,41	0,05	0,28	0,28	0,15
8 - 16	5,8	1,53	0,07	0,41	0,11	0,53	0,04	0,13	0,20	0,14
16 - 32	5,7	2,14	0,09	0,32	0,08	0,26	0,04	0,13	0,17	0,12
32 - 64	6,4	0,40	0,03	0,35	0,03	0,10	0,01	0,05	0,15	0,09
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innevillgraten										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	0,69	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	0,81	-	-	-	0,11	0,19	0,08
1 - 2	6,1	0,79	0,11	1,04	0,16	0,84	0,14	0,18	0,33	0,24
2 - 4	5,8	1,59	0,07	0,69	0,07	0,27	0,04	0,11	0,18	0,11
4 - 8	6,0	1,09	0,10	0,52	0,09	0,33	0,04	0,12	0,21	0,15
8 - 16	5,9	1,34	0,06	0,59	0,10	0,25	0,04	0,10	0,14	0,12
16 - 32	6,1	0,72	0,05	0,58	0,07	0,36	0,04	0,11	0,14	0,15
32 - 64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tage mit geringen Niederschlägen liefern relativ wenig Stoffeintrag. Die ergiebigen Niederschläge (16 bis 128 mm pro Tag) verursachten dagegen größere Stoffeinträge, wie in der Tabelle 16 zu erkennen ist. Ergänzend zu den absoluten Stoffeinträgen werden in der Tabelle 17 auch die relativen Beiträge, aufgeteilt auf die einzelnen Niederschlagsklassen, angegeben. Die deutlichen Beiträge der Niederschlagsklasse 8 bis 16 mm pro Tag sind auch auf das häufigere Auftreten dieser Ereignisse zurückzuführen.

Als Beispiel für die Bedeutung von Starkregenereignissen sei an dieser Stelle die Station Höfen angeführt. In der Untersuchungsperiode 2022 führten 121 Regentage mit Niederschlagsmengen bis 16 mm (das sind 85% aller Niederschlagstage) zu 61% des gesamten Sulfatschwefeleintrages, während 22 Ereignisse mit > 16 mm Niederschlag (15% aller Niederschlagstage) die restlichen 39% des Eintrags an Sulfat-S bewirkten.

Tabelle 16: Nasse Deposition je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[-]	[g/ha]				[kg/ha]				
Höfen										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	0,06	-	-	-	0,02	0,03	0,02
1 - 2	5,9	0,28	0,06	0,13	0,02	0,19	0,05	0,12	0,09	0,05
2 - 4	6,2	0,61	0,18	0,40	0,06	0,83	0,20	0,28	0,28	0,15
4 - 8	6,1	1,56	0,22	0,77	0,14	1,55	0,29	0,28	0,51	0,34
8 - 16	6,0	2,51	0,29	0,83	0,29	3,56	0,33	0,46	0,52	0,41
16 - 32	6,1	3,26	0,22	0,86	0,12	1,68	0,26	0,42	0,57	0,34
32 - 64	6,1	1,19	0,09	0,53	0,07	0,92	0,10	0,13	0,21	0,19
64 - 128	6,2	0,41	0,02	0,27	0,02	0,12	0,02	0,03	0,12	0,09
Niederndorferberg										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,3	0,08	0,07	0,12	0,02	0,08	0,02	0,12	0,09	0,04
2 - 4	5,5	3,00	0,31	0,48	0,12	1,58	0,10	0,51	0,41	0,26
4 - 8	5,5	6,18	0,35	0,96	0,19	0,85	0,11	0,60	0,60	0,31
8 - 16	5,8	5,14	0,23	1,39	0,36	1,79	0,14	0,43	0,68	0,47
16 - 32	5,7	6,02	0,25	0,89	0,23	0,73	0,10	0,37	0,48	0,33
32 - 64	6,4	0,77	0,06	0,67	0,05	0,19	0,02	0,10	0,29	0,18
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innervillgraten										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	0,08	-	-	-	0,01	0,02	0,01
1 - 2	6,1	0,22	0,03	0,29	0,04	0,24	0,04	0,05	0,09	0,07
2 - 4	5,8	0,90	0,04	0,39	0,04	0,16	0,02	0,06	0,10	0,06
4 - 8	6,0	2,09	0,18	0,99	0,17	0,63	0,08	0,24	0,41	0,29
8 - 16	5,9	2,48	0,12	1,09	0,18	0,46	0,07	0,18	0,26	0,22
16 - 32	6,1	1,41	0,10	1,14	0,14	0,70	0,07	0,22	0,27	0,30
32 - 64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 17: Verteilung der Regeninhaltsstoffe je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺ -N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻ -S
[mm]	[%]								
Höfen									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	1,5	-	-	-	1,0	1,4	1,4
1 - 2	2,8	5,3	3,4	2,9	2,2	3,7	6,9	4,0	3,0
2 - 4	6,2	17,2	10,3	8,4	9,4	15,9	16,4	11,8	9,1
4 - 8	15,9	20,2	20,0	19,4	17,5	23,4	16,1	21,9	21,5
8 - 16	25,6	26,7	21,5	40,3	40,3	26,2	26,3	22,1	25,6
16 - 32	33,3	20,3	22,4	16,8	19,0	21,2	24,1	24,4	21,7
32 - 64	12,1	8,8	13,8	10,0	10,4	7,7	7,2	9,0	12,2
64 - 128	4,1	1,5	7,0	2,3	1,3	1,8	1,9	5,3	5,5
Niederndorferberg									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	0,4	5,4	2,8	1,9	1,6	3,9	5,7	3,5	2,8
2 - 4	14,2	24,5	10,6	12,2	30,2	19,6	23,9	16,0	16,2
4 - 8	29,2	27,8	21,3	19,7	16,3	22,5	28,0	23,4	19,1
8 - 16	24,3	18,2	30,7	37,6	34,3	28,8	20,2	26,7	29,7
16 - 32	28,4	19,7	19,7	23,6	14,0	20,7	17,6	18,8	21,0
32 - 64	3,6	4,5	14,9	5,1	3,6	4,5	4,5	11,5	11,3
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Innervillgraten									
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	2,0	-	-	-	1,4	1,6	0,8
1 - 2	3,2	6,8	7,4	7,6	10,9	13,5	6,7	8,0	7,3
2 - 4	12,7	8,6	9,8	7,2	7,1	7,9	8,4	8,9	6,7
4 - 8	29,5	38,6	24,8	29,7	28,7	29,1	30,9	35,5	30,4
8 - 16	34,8	24,2	27,2	31,5	21,0	24,6	23,2	22,7	23,0
16 - 32	19,9	21,9	28,5	24,0	32,2	25,0	29,4	23,3	31,9
32 - 64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4. Zusammenfassung

- Das Monitoring des Stoffeintrags zur Nassen Deposition in Tirol fand im Jahr 2022 an den Messpunkten Niederndorferberg, Höfen und Innervillgraten eine erfolgreiche Fortsetzung. Die mittleren pH-Werte lagen sowohl bei den Stationen in Nordtirol als auch in Osttirol im Bereich der natürlichen Acidität des Niederschlagswassers. Die jährlichen Stoffeinträge über die Nasse Deposition lagen in Nordtirol bei 1,6 kg S/ha (beide Messpunkte) sowie 6,2 und 7,0 kg N/ha, während in Innervillgraten (Osttirol) Einträge von 1 kg S/ha und 5,1 kg N/ha bestimmt wurden. Das Monitoringprogramm, das seit der Mitte der 1980er Jahre durchgeführt wird, erlaubt die Darstellung langjähriger Trends. Die langjährigen Trends der Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat und Nitrat-Stickstoff sind an allen drei Stationen fallend. Für Ammonium-Stickstoff gilt dies nur für die Stationen in Nordtirol.
- Der durchschnittliche jährliche Eintrag von Sulfat-Schwefel durch nasse Deposition nahm seit Beginn der Messungen deutlich ab. Aus der Trendanalyse ergeben sich Reduktionen um 3,1 kg SO₄²⁻-S/ha (Innervillgraten), 5,9 kg SO₄²⁻-S/ha (Höfen) und 7,7 kg SO₄²⁻-S/ha (Niederndorferberg). Auch der durchschnittliche jährliche Eintrag an Gesamtstickstoff war an zwei Stationen rückläufig. In Niederndorferberg lag diese Abnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum bei 5,8 kg N/ha und in Höfen bei 6,0 kg N/ha. Innervillgraten zeigt hingegen, bedingt durch einen hohen Beitrag an Ammonium-Stickstoff, eher eine Zunahme des Gesamtstickstoffeintrags im gesamten Untersuchungszeitraum. Grund dafür scheint eine zunehmende Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung der Umgebung der Messstelle zu sein. Auf Basis des aktuellen Datensatzes ist diese Zunahme aber nicht signifikant.
- Der jährliche Schwefeleintrag durch Nasse Deposition liegt auch im Jahr 2022 unter dem Grenzwert (3 kg/ha/Jahr) der WHO (1995). Wie im Vorjahr liegt auch der Eintrag an Stickstoff durch nasse Deposition an allen Stationen unter dem Grenzwert (10 kg/ha/Jahr) für sensible Ökosysteme gemäß dem Konzept der Critical Loads. Eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge ist allerdings weiterhin wichtig, da neben der nassen Deposition auch die trockene Deposition und direkte Einträge über den Nebel wirksam werden und nährstoffarme Ökosysteme beeinträchtigen.
- Die Konzentrationswerte der Ionen im Niederschlag nehmen zwar mit zunehmender Regenmenge ab, jedoch tragen Tage mit großen Regenmengen (>16 mm) überdurchschnittlich zu den Stoffeinträgen bei.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Josef Bergmann (Innervillgraten), Richard Schwaighofer (Niederndorferberg) und Gertraud Scheiber (Höfen) für die tägliche Betreuung der WADOS-Messstellen und die zuverlässige Zusammenarbeit. Weiters gilt Dank Martin Perlornigg, Werner Nocker und Dionys Schatzer (alle Abt. Waldschutz) für die Unterstützung bei den WADOS Messungen und Manfred Recheis (Sg. Chemisch-technische Umweltschutzanstalt) für die Abwicklung der Probenanalysen.

5. Literatur

Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz (1984) Richtlinie 11, Immissionsmessung des nassen Niederschlags und des sedimentierten Staubes, Luftverunreinigung - Immissionsmessung, Wien.

Cehak K., Chalupa K. (1985) Observations of various chemical contaminants of the precipitation at a BAPMoN station in the Eastern Pre-Alpine Region, Arch. Met. Geophys. Bioclimat. B35, 307-322.

Granat L. (1978) Sulfate in precipitation as observed by the European Atmospheric Chemistry Network, Atmospheric Environment 12, 413-424.

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2006): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 178 Hopfgarten in Deferegggen

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2007): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 90 Kufstein.

Hand J. L., Schichtel B. A., Malm W. C., and Pitchford M. L. (2012) Particulate sulfate ion concentration and SO₂ emission trends in the United States from the early 1990s through 2010. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 10353-10365.

Hedin L.O., Granat L., Likens G.E., Rodhe H. (1991) Strong similarities in seasonal concentration ratios of SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ in precipitation between Sweden and northeast US, Tellus 43B, 454-462.

Herman F., Knoflacher M., Loibl W., Kalina M. and Smidt S. (1998) Risk assessment by nitrogen input in the European Alps, in Responses of plant metabolism to air pollution and global change, ed. by L.J. De Kok and I. Stulen, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 329-332.

Horvath L., Meszaros E. (1984) The composition and acidity of precipitation in Hungary, Atmospheric Environment 18, 1843-1847.

Kalina M.F., Puxbaum H. (1994) A study of the influence of riming of ice crystals on snow chemistry during different seasons in precipitation continental clouds, Atmospheric Environment Vol.28., 20, 3311-3328.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1991, Bericht 9/94, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1992, Bericht 3/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., Puxbaum H., Tsakovski S. and Simeonov V. (1999) Time trends in the concentrations of lead in wet precipitation from rural and urban sites in Austria, Chemosphere 38, 11, 2509-2515.

Kalina M. F., Schatten A., Puxbaum H., Biebl P. (1995) "Saurer Regen", Nasse Deposition im Land Salzburg, Oktober 1983 bis September 1994, Ergebnisse der elfjährigen Meßserie, Bericht 4/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., S. Stopper, E. Zambo, H. Puxbaum (2002) Altitude-dependent wet, dry and occult nitrogen deposition in an Alpine region (Achenkirch, Austria, 920 m - 1758 m a.s.l.). Environmental Science & Pollution Research 2, 16-22.

Kalina M. F., Zambo E. and Puxbaum H. (1998) Assessment of wet, dry and occult deposition of sulfur and nitrogen at an alpine site, Environmental Science & Pollution Research 1, 53-58.

Kasper A., Puxbaum H. (1994) Determination of SO₂, HNO₃, NH₃ and aerosol components at an high alpine background site with a filter pack method, Analitica Chimica Acta 291, 297-304.

Kovar A., Puxbaum H. (1990) A simple model to explain spring maximum of sulfate concentration in precipitation water, Int. Conference on Acidic Deposition, Glasgow, 1990.

Meszaros E. (1974) On the spring maximum of the concentration of trace constituents in atmospheric precipitation, Tellus 24, 402-407.

Miles L.J., Yost K.J. (1982) Quality analysis of USGS precipitation chemistry data for New York, Atmospheric Environment 16, 2889-2898.

Nagel H. D. und Gregor H. D. (1999) Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels, Verlag Springer, ISBN 3-540-62418-X

- Puxbaum H. and Gregori Kalina M. (1998) *Seasonal and Annual Deposition Rates of Sulfur, Nitrogen and Chloride Species to an Oak Forest in North-Eastern Austria (Wolkersdorf, 240 m a.s.l.)*, *Atmospheric Environment* 32, 3557-3568.
- Puxbaum H., Kovar A., Kalina M. (1991) *Chemical Composition and Fluxes of Wet Deposition at Elevated Sites (700-3105 m a.s.l.) in the Eastern Alps (Austria)*, NATO ASI Series, Vol. G28, *Seasonal Snowpacks*, ed. by T.D. Davies et al., Verlag Springer Berlin Heidelberg, 273-297.
- Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M. (1998) *Ten years trends (1984-1993) in the precipitation chemistry in Central Austria*, *Atmospheric Environment* 32, 193-202.
- Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Tsakovski S., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2002) *Long-Term assessment of the wet precipitation chemistry in Austria (1984-1999)*, *Chemosphere* 48, 733-747.
- Rhode H., Granat L. (1984) *An evaluation of sulfate in European precipitation 1955-1982*, *Atmospheric Environment* 18, 2627-2639.
- RÖHRING, M. (1997): *Über geologische Aufnahmen in den Nördlichen Kalkalpen (Lechtaler Alpen) auf Blatt 115 Reutte Bericht 1997*. http://www.geologie.ac.at/filestore/download/JB1413_276_A.pdf
- Schreiner E., Kasper-Giebl A. and Lohninger H. (2016) *Temporal and spatial trends of chemical composition of wet deposition samples collected in Austria*. EGU General Assembly 2016, Vol. 18, EGU2016-15374
- Simeonov V., Puxbaum H., Tsakovski S., Sarbu C. and Kalina M. (1999) *Classification and receptor modeling of wet precipitation data from Central Austria*, *Environmetrics* 10, 137-152.
- Smith F.B. and Hunt R.D. (1978) *Meteorological aspects of the transport of pollution over long distances*, *Atmospheric Environment* 12, 1921-1932.
- TIROL ATLAS, 2017. *Geographie Innsbruck*. <http://tirolatlas.uibk.ac.at/graphics/lieth/index.html.de>
- Torseth K, Aas W., Breivik K., Fjerss A.M., Fiebig M., Hjellbrekke A.G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K.E. (2012) *Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009*. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 5447-5481.
- Tsakovski S., Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2000) *Trend, seasonal and multivariate modelling study of wet precipitation data from the Austrian Monitoring Network (1990-1997)*, *Journal of Environmental Monitoring* 2, 424-431.
- Vet R. et al. 21 authors (2014) *A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulphur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity und pH, and phosphorus*. *Atmospheric Environment* 93, 3-100.
- Walter H. & Lieth H. 1960. *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena, VEB G. Fischer.
- WHO (1995) *Updating and revision of the air quality guidelines for Europe*. Rept. on the WHO Working Group on Ecotoxic Effects, Les Diablerets, Sept 21-23, 1994.
- WORLD Meteorological ORGANISATION GLOBAL ATMOSPHERE WATCH. (2004) *Manual for the GAW precipitation chemistry programme No. 160, WMO TD No. 1251* (http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1251.pdf).